

APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MÉTODO DE ESTIMATIVA DA INFLUÊNCIA DO SOMBREAMENTO PARCIAL NA GERAÇÃO ENERGÉTICA DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A EDIFICAÇÕES

Clarissa Debiasi Zomer – clazomer@gmail.com

Ricardo Rüter – ricardo.ruther@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

Resumo. *Sistemas fotovoltaicos integrados a edificações inseridas em meio urbano tendem a receber sombreamentos parciais tanto do entorno quanto de elementos da própria edificação, além de apresentarem limitações para o posicionamento dos módulos. Estes fatos comprometem a sua geração energética. Esta pesquisa teve como objetivo a aplicação e a avaliação do método simplificado para determinar um índice que quantifique as perdas energéticas decorrentes de sombreamento parcial em geradores solares fotovoltaicos, apresentado na tese de doutorado da autora, buscando, assim, ampliar o escopo do trabalho apresentado anteriormente. O método proposto consiste em identificar e quantificar o sombreamento em uma superfície, relacionar a fração de área sombreada com o percentual de redução da irradiação global incidente no mesmo período e propor um índice de sombreamento (IS) que traduza as perdas na geração energética de sistemas parcialmente sombreados. Na tese, o método foi baseado em simulações computacionais para duas superfícies horizontais em duas localidades: Florianópolis (27,48°S) e Cingapura (1,04°N). Na presente pesquisa, um novo modelo tridimensional foi analisado, contendo cinco superfícies com diferentes inclinações e desvios azimutais, comuns a edificações urbanas. O estudo foi baseado em simulações utilizando o software Ecotect e bases de dados climáticos de 10 cidades disponibilizados pelo U.S. Department of Energy. As cidades selecionadas estão localizadas em diferentes faixas de latitudes, cobrindo uma malha representativa de casos. Os resultados mostraram que, na maioria dos casos, o percentual anual de sombreamento foi bastante próximo à redução de irradiação incidente nos planos devido ao sombreamento, validando, portanto, a tese previamente apresentada.*

Palavras-chave: *Geração fotovoltaica, sombreamento parcial em sistemas fotovoltaicos, Ecotect.*

1. INTRODUÇÃO

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) tem investido em programas de P&D e na promoção de leilões para aumentar a competitividade e diversidade das fontes renováveis na matriz energética brasileira, enfatizando recentemente a fonte solar (Costa, 2015). Suas recentes ações regulatórias, tais como a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte (net metering), têm incentivado de forma significativa o crescimento da micro (até 75 kWp) e da mini (de 75 kWp a 5 MWp) geração distribuída de energia elétrica (ANEEL, 2015; EPE, 2016).

No ano de 2016, a geração distribuída atingiu 104,1 GWh com uma potência instalada de 72,4 MWp, com destaque para a fonte solar fotovoltaica (FV), com geração de 53,6 GWh e potência instalada de 56,9 MWp (EPE, 2017). O incremento anual da energia solar para a matriz energética tem sido tão expressivo que esta fonte passou a ter mais visibilidade a partir do Balanço Nacional de Energia de 2016, deixando, pela primeira vez, de aparecer nas tabelas apenas como “Outras Renováveis”.

De acordo com o BIG (Banco de Informações de Geração) da ANEEL, em março de 2017, o Brasil possuía 23 MWp de potência instalada em usinas FV. Em setembro do mesmo ano, a potência instalada já era de mais de 236 MWp (BIG, 2017) e, considerando as construções de usinas solares já iniciadas ou com projetos já aprovados, somam-se 103 novas usinas, com um total de 2,7 GWp de capacidade instalada. Este crescimento exponencial indica que o país tem um futuro promissor para esta tecnologia fotovoltaica (Martins *et al.*, 2008; Rüter and Zilles, 2011).

A tecnologia fotovoltaica gera energia de forma silenciosa e pode ser instalada de forma modular, ou seja, desde baixas potências, como em calculadoras, até grandes potências, como são os casos em usinas solares. No entanto, o grande diferencial desta tecnologia é o fato dela poder integrar-se ao envelope das edificações e equipamentos urbanos, integrando-se ao meio urbano, compondo a cidade e gerando espaços de dupla função: que abrigam e que produzem energia. Quando empregada desta forma, outra importante característica desta tecnologia é ressaltada: a possibilidade de gerar energia junto ao ponto de consumo, minimizando perdas de transmissão e distribuição inerentes à energia entregue por centrais geradoras convencionais (Bazilian *et al.*, 2001; Bahaj and James, 2007; Attia and Herde, 2010; Chivelet, 2010; Frontini *et al.*, 2012). As possibilidades de integração arquitetônica são infinitas e estão à disposição dos arquitetos e engenheiros. Basta que os mesmos tomem partido desta tecnologia e exerçam sua criatividade projetual para dar forma a espaços de alta qualidade arquitetônica, técnica e estrutural.

Um forte impulsionador para a utilização crescente da tecnologia fotovoltaica é a sua contínua redução de custos. Até bem pouco tempo atrás, os módulos fotovoltaicos representavam a maior fração nos custos de um sistema. Atualmente, eles passaram a corresponder a 12% do custo total (NREL, 2017). Esta redução de custos impacta diretamente na forma de utilização dos módulos fotovoltaicos, tirando deles a responsabilidade de serem utilizados sempre de modo a maximizar a sua geração energética. Pelo contrário, com a redução de custos, até mesmo utilizar módulos em situações não consideradas ideais, como, por exemplo, em situações de sombreamentos parciais (Norton *et al.*, 2010), pode se tornar justificável. Neste contexto, poder prever o sombreamento, quantificá-lo e saber a influência que o mesmo causará na geração de energia elétrica é de extrema importância e necessidade quando se fala em geradores integrados ao meio urbano.

Esta pesquisa teve como foco a aplicação e avaliação do método simplificado para análise de perdas energéticas por sombreamento, apresentado na tese de doutorado da autora (Zomer, 2014), em um maior número de casos, ampliando, assim, o escopo do trabalho apresentado anteriormente. Na tese que originou este trabalho, o método foi baseado em simulações computacionais para duas superfícies horizontais em duas localidades: Florianópolis (27,48°S) e Cingapura (1,04°N). Na presente pesquisa, um novo modelo tridimensional foi analisado, contendo cinco superfícies com diferentes inclinações e desvios azimutais. Este modelo foi simulado em 10 cidades localizadas em diferentes faixas de latitudes, cobrindo, portanto, uma malha representativa de casos.

2. OBJETIVO

O objetivo central desta pesquisa consistiu na aplicação e avaliação do método simplificado para determinar um índice que quantifique as perdas energéticas decorrentes de sombreamento parcial em geradores solares fotovoltaicos, apresentado na tese de doutorado da autora (Zomer, 2014), a fim de relacionar o percentual de redução de irradiação solar incidente com o percentual de área sombreada em diferentes condições de inclinação, desvio azimutal e localização geográfica.

3. MÉTODO

O método desta pesquisa foi dividido em quatro etapas.

3.1 Modelo tridimensional

A primeira etapa consistiu na elaboração de um modelo tridimensional de uma edificação com superfícies de cobertura com diferentes inclinações e desvios azimutais. O modelo analisado pode ser visualizado na Fig.1 e consiste em uma edificação residencial com telhado de quatro águas, orientadas a norte, leste, oeste e sul, com inclinação de 28° nas orientações norte e sul e 24° nas orientações leste e oeste; além de uma superfície horizontal. Todas as superfícies analisadas possuem obstáculos próximos causadores de sombreamento, portanto, o entorno foi modelado juntamente com a edificação.

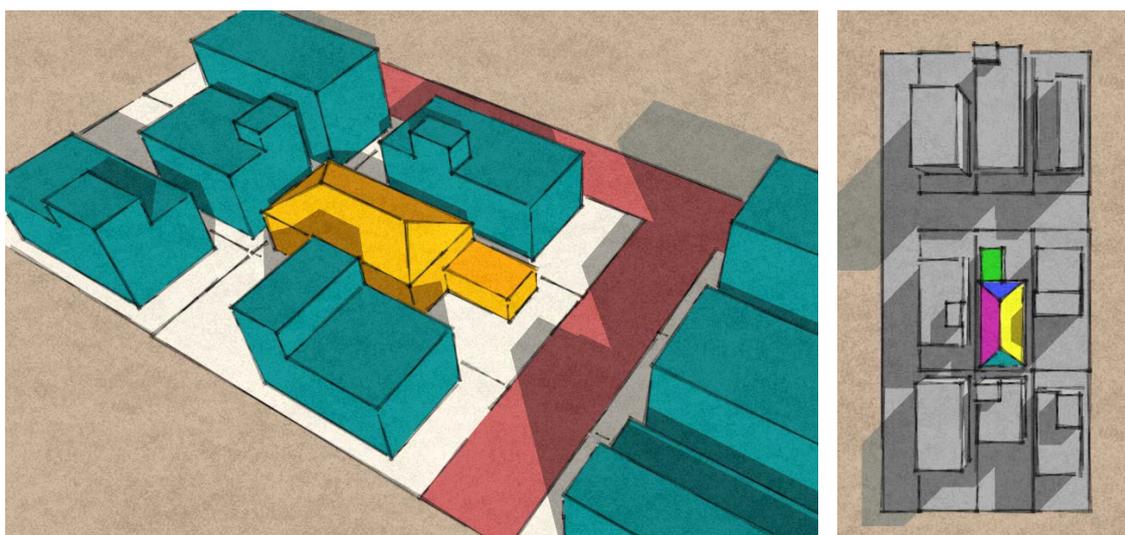


Figura 1 - Modelo tridimensional analisado.

3.2 Percentual de sombreamento

A partir do método apresentado na tese de doutorado da autora (Zomer, 2014), o qual baseia-se em análises de sombreamento utilizando o software Ecotect, a segunda etapa desta pesquisa foi a quantificação do sombreamento horário, diário, mensal e anual de cada superfície. Esta etapa foi realizada para 10 localidades com faixas de latitude variando entre 0° a 60° ao norte ou ao sul. A escolha das localidades foi baseada na disponibilidade de dados climáticos em formato .epw no banco de dados do *website* do *U.S. Department of Energy*. As cidades selecionadas e suas respectivas latitudes foram:

1. Buenos Aires/Argentina – latitude 34°S
2. Brisbane/Austrália – latitude 27°S
3. Brasília/Brasil – latitude 15°S
4. Nairobi/Quênia – latitude 1°S
5. Bogotá/Colômbia – latitude 4°N
6. Bangkok/Tailândia – latitude 13°N
7. New Delhi/Índia – latitude 28°N
8. Los Angeles/Estados Unidos – latitude 34°N
9. Madri/Espanha – latitude 40°N
10. Londres/Reino Unido – latitude 51°N

A Fig.2 apresenta a localização de cada cidade selecionada no atlas mundial.



Figura 2 - Cidades selecionadas para estudo.

3.3 Redução de irradiação incidente

Em seguida, a irradiação solar incidente com e sem sombreamento foi quantificada e o percentual de redução de irradiação solar incidente foi calculado para cada superfície em cada uma das 10 localidades. Esta análise levou em consideração as componentes direta e difusa da irradiação solar e foi realizada nas bases horária, diária, mensal e anual.

3.4 Índice de perdas por sombreamento

Por fim, os percentuais de sombreamento e de redução de irradiação incidente foram comparados em diferentes bases temporais, considerando as diferentes componentes da irradiação solar global, direta e difusa. O índice de sombreamento foi definido a partir da base temporal que apresentou melhor coincidência entre o percentual de sombreamento e o percentual de redução de irradiação incidente.

4. RESULTADOS

4.1 Percentual de sombreamento anual

O percentual de sombreamento, calculado através da ferramenta de máscaras de sombreamento, foi calculado cada uma das orientações, para as 10 localidades. A Fig.3 apresenta as máscaras de sombreamento de cada superfície para a cidade de Buenos Aires.

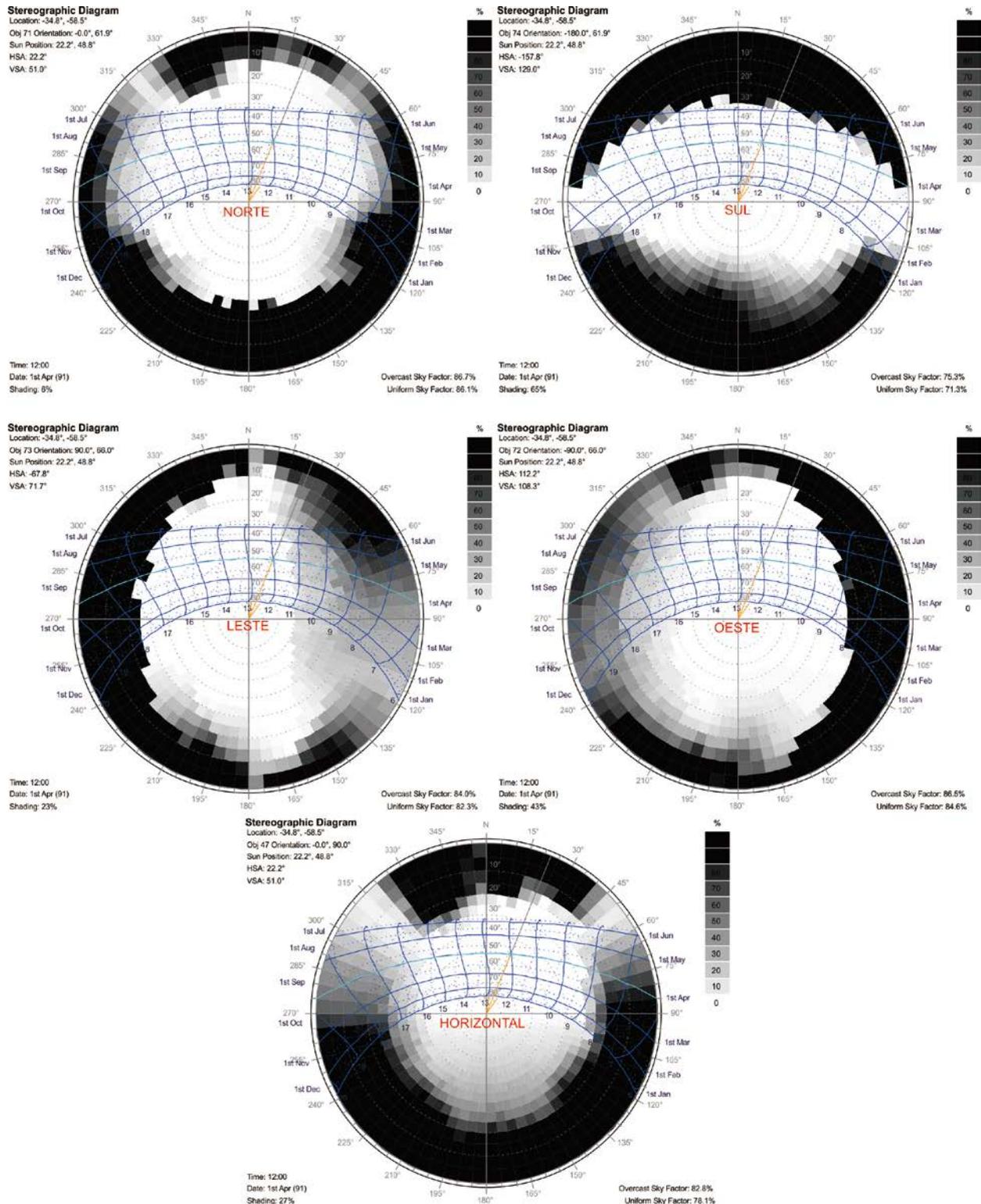


Figura 3 - Máscaras de sombreamento das superfícies analisadas na cidade de Buenos Aires.

Os percentuais de sombreamento anuais das 10 cidades, obtidos através da análise por máscara de sombreamento, estão apresentados na Fig.4.

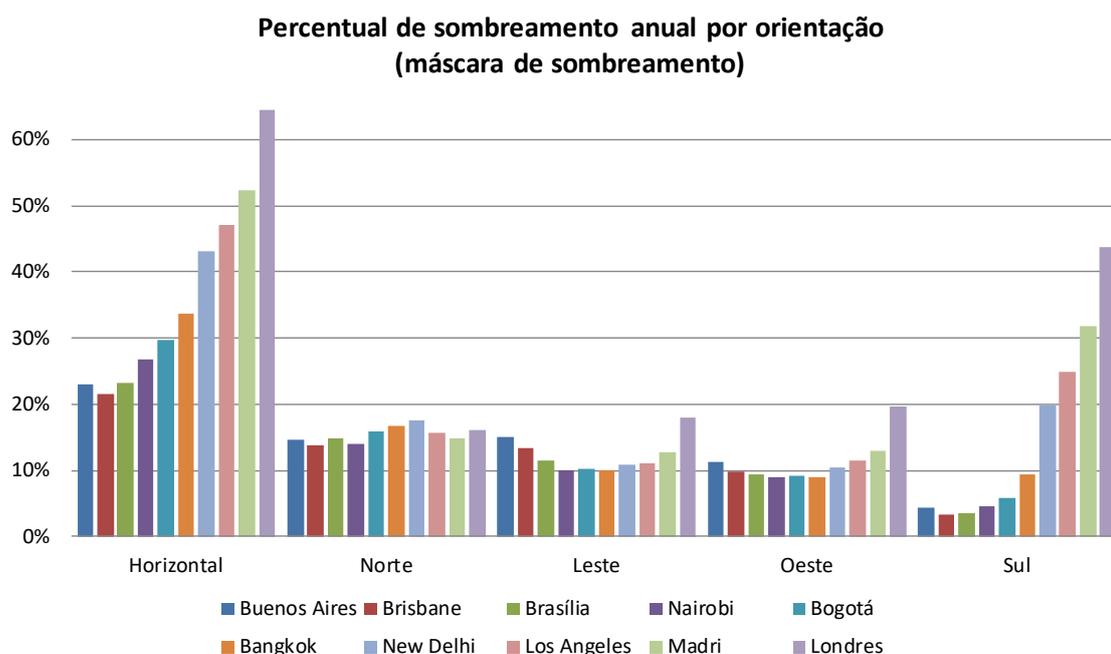


Figura 4 - Percentual de sombreamento anual obtido através das máscaras de sombreamento para as dez cidades analisadas, para as cinco orientações, através da análise por máscara de sombreamento.

A Fig.4 demonstra que, apesar da grande variação de latitudes analisadas, os percentuais anuais de sombreamento são bastante semelhantes para as todas as cidades quando comparadas nas orientações norte, leste e oeste, com exceção da cidade de Londres.

O percentual de sombreamento anual também foi calculado através da ferramenta de exposição solar e está apresentado na Fig.5.

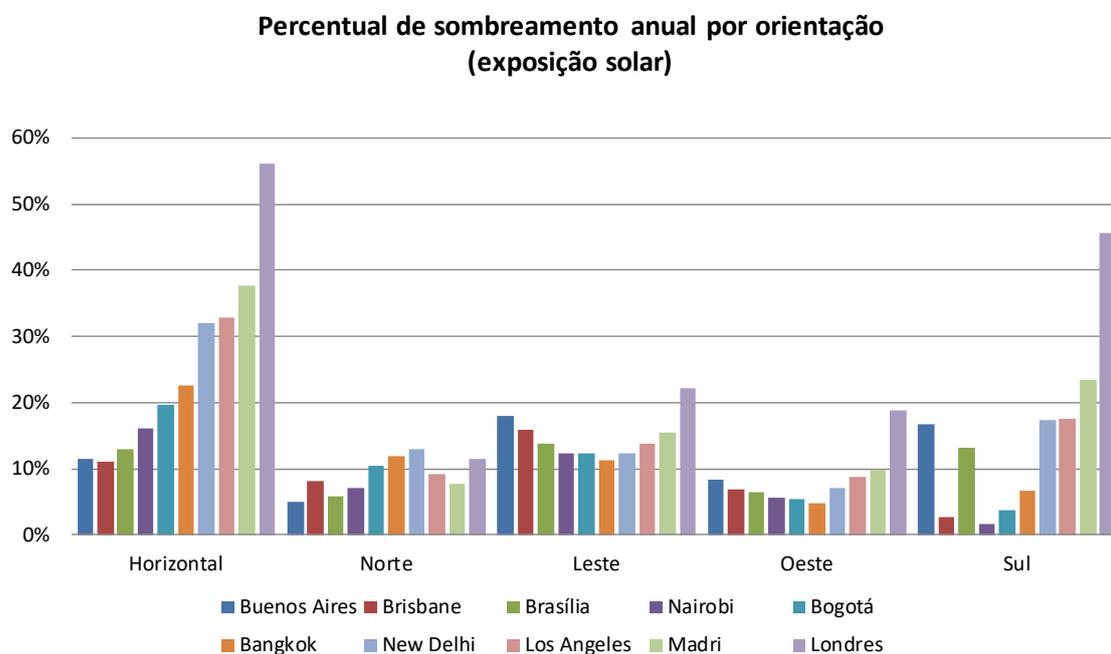


Figura 5 - Percentual de sombreamento anual obtido através das máscaras de sombreamento para as dez cidades analisadas, para as cinco orientações através da análise de exposição solar.

Através de uma análise estatística entre os dois métodos de obtenção de percentual de sombreamento anual, verificou-se que não houve diferença entre as médias, considerando um nível de significância de 5%.

4.2 Comparação entre o percentual de sombreamento e o percentual de redução de irradiação incidente em diferentes bases temporais.

A etapa de comparação entre o percentual de sombreamento e o percentual de redução de irradiação incidente em diferentes bases temporais foi realizada através da ferramenta de análise de exposição solar do software Ecotect. Esta análise é mais complexa e demanda mais tempo do que a análise através da máscara de sombreamento, que fornece os resultados apenas em valores anuais.

Os resultados para a cidade de Buenos Aires podem ser visualizados através da Fig.6.

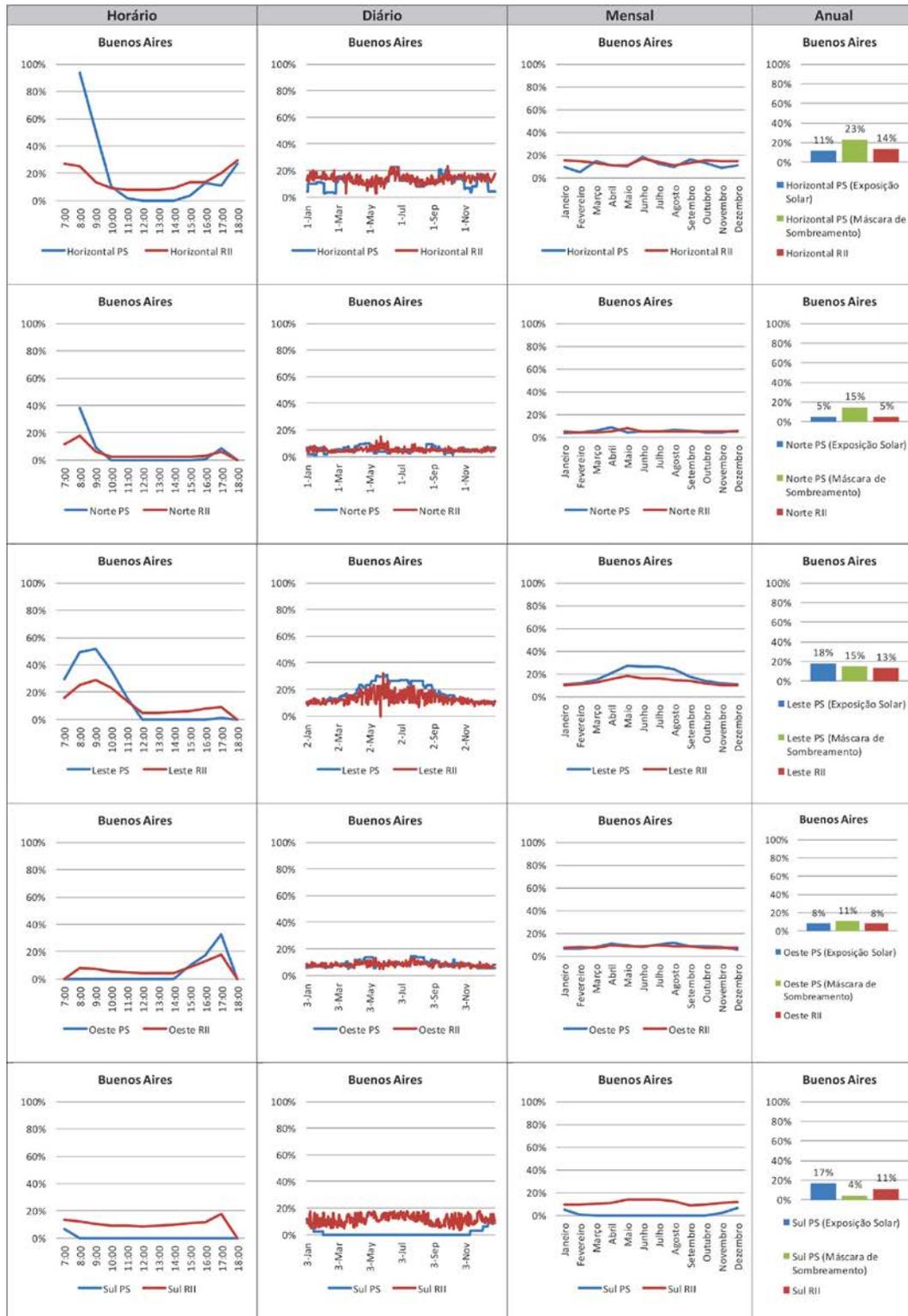


Figura 6 - Comparação entre o percentual de sombreamento e o percentual de redução de irradiação incidente nas bases horária, diária, mensal e anual. Na base anual, estão apresentados os percentuais de sombreamento disponibilizados pela máscara de sombreamento e pela análise de exposição solar.

Para a cidade de Buenos Aires, pode-se perceber que houve uma relação entre o sombreamento e a redução de irradiação incidente em todas as bases temporais, porém ela não foi linear e nem é previsível. Além disso, a relação entre ambos os valores se diferencia em relação à orientação da superfície analisada. No plano voltado ao sul, o percentual de sombreamento é sempre inferior ao percentual de redução de irradiação incidente. No plano voltado ao leste, nas primeiras horas da manhã, o percentual de sombreamento é superior à redução de irradiação incidente, mas no período da tarde a relação se inverte. Nas demais cidades, observou-se que em alguns casos o percentual de sombreamento e o percentual de redução de irradiação incidente em bases horária, diária e mensal chegavam a ser praticamente coincidentes enquanto em outras localidades o mesmo não ocorria. Estas diferenças estão relacionadas ao fato de que uma área 50% sombreada no início da manhã não sofre uma redução de 50% de irradiação incidente naquele instante, pois, apesar do sombreamento reduzir significativamente a fração de irradiação direta, ele tem pouco impacto na fração de irradiação difusa.

Devido a esta grande variação, constatou-se que não seria confiável utilizar as bases de dados com maiores resoluções (horária, diária e mensal) para as comparações entre sombreamento e influência na irradiação incidente em um plano. Na tese que originou este artigo, ao se adotar como base temporal o período de um ano, as diferenças encontradas nas bases anteriores (horária, diária e mensal) foram equilibradas e o balanço final entre o percentual de área sombreada e o percentual de redução de irradiação incidente foram próximos à zero. Portanto, a etapa seguinte da presente pesquisa consistiu em focar o estudo nas estimativas de sombreamento e irradiação solar anuais.

Nesta etapa, todas as cidades foram comparadas entre si de acordo com a orientação da superfície. A Fig.7 apresenta a comparação entre o percentual de sombreamento anual por máscara de sombreamento, por análise de exposição solar e o percentual de redução de irradiação incidente para as cinco orientações das superfícies analisadas.



Figura 7 - Comparação entre o percentual de sombreamento anual por máscara de sombreamento (SM), por análise de exposição solar (ES) e o percentual de redução de irradiação incidente (RII) para as cinco orientações das superfícies analisadas.

De acordo com a Fig.7, os valores de sombreamento anuais obtidos pelas máscaras de sombreamento para a superfície horizontal foram sempre superiores aos percentuais obtidos pela análise de exposição solar e os percentuais de redução de irradiação incidente. Estes dois últimos, por sua vez, apresentaram valores bastante próximos entre si.

Na superfície norte, o percentual de sombreamento por máscara de sombreamento (SM) também foi superior aos demais valores para todas as localidades. Para as cidades localizadas no Hemisfério Sul, os valores de redução de irradiação incidente foram coincidentes com os valores de exposição solar. Já para as cidades localizadas no Hemisfério Norte, a redução de irradiação incidente foi bastante inferior ao percentual de sombreamento.

A superfície sul foi a que apresentou as maiores perdas de irradiação solar quando comparadas aos seus respectivos percentuais de sombreamento, com destaque para as cidades do Hemisfério Sul. No Hemisfério Norte, apesar de maiores percentuais de sombreamento, as perdas de irradiação solar foram menores.

Nas superfícies leste e oeste, os três valores comparados foram bastante próximos, com maior variação apenas para a cidade de Londres, ou seja, a cidade de maior latitude.

Ao observarmos a faixa de latitude de cada cidade e a posição mais indicada para aproveitamento da irradiação solar, podemos tirar as seguintes conclusões:

- Na posição horizontal, para as cidades mais próximas ao Equador (Brasília, Nairobi, Bogotá e Bangkok), as estimativas de percentual de sombreamento por exposição solar e percentual de irradiação incidente foram praticamente coincidentes. Nestas cidades, os sistemas fotovoltaicos possuem, em sua maioria, baixas inclinações.
- Na posição norte, as cidades do Hemisfério Sul apresentaram valores praticamente coincidentes de percentual de sombreamento por exposição solar e percentual de redução de irradiação incidente. Nestas cidades, os sistemas fotovoltaicos são, em sua maioria, instalados orientados ao norte, com inclinações entre 10° e 30°.
- Na posição sul, New Delhi, Los Angeles e Madri apresentaram valores coincidentes entre percentual de sombreamento por exposição solar e percentual de redução de irradiação incidente. Nestas cidades, os sistemas fotovoltaicos são, em sua maioria, instalados orientados ao sul, com inclinações entre 10° e 30°.

Portanto, apesar das diferenças nos percentuais de sombreamento e dos percentuais de redução de irradiação incidente encontrados em algumas combinações de orientação e cidades, a grande maioria dos sistemas fotovoltaicos são instalados de forma a tirar o melhor proveito da energia solar e, nestes casos, os valores de percentual de sombreamento anual e percentual de redução de irradiação incidente tendem a ser coincidentes, tornando o método apresentado na tese da autora válido e confiável.

5. CONCLUSÕES

Na tese que originou esta pesquisa, concluiu-se que, para as superfícies horizontais analisadas em Cingapura (1,04°N) e Florianópolis (27,48°S) o percentual de sombreamento anual foi o que apresentou melhor coincidência com a real redução de irradiação incidente. Este resultado simplifica as futuras análises de perdas por sombreamento para casos semelhantes, demonstrando que uma simples análise de sombreamento anual já refletiria as possíveis perdas na geração energética de um sistema fotovoltaico parcialmente sombreado. Porém, entende-se que ampliar o número de regiões geográficas abordadas bem como o número de características das superfícies analisadas seria um importante passo à melhor definição deste resultado.

Portanto, esta pesquisa teve como objetivo central a aplicação e avaliação do método simplificado para determinar um índice que quantifique as perdas energéticas decorrentes de sombreamento parcial em geradores solares fotovoltaicos, apresentado na tese da autora, a fim de relacionar o percentual de redução de irradiação solar incidente com o percentual de área sombreada em diferentes condições de inclinação, desvio azimutal e localização geográfica.

Os resultados mostraram que, ao se adotar o percentual de sombreamento anual para se estimar as perdas em um sistema fotovoltaico, o projetista estaria superestimando suas perdas em quase todas as situações apresentadas, com maiores diferenças para algumas cidades nas superfícies horizontal, norte e sul.

No entanto, este fato por si só já é positivo ao sistema fotovoltaico, pois indica que mesmo com percentuais de sombreamento anuais elevados, estas superfícies ainda recebem uma boa quantidade de irradiação solar incidente, fato que é decorrente da composição da irradiação solar (direta e difusa, bem como reflexões das superfícies vizinhas).

Ao se aprofundar as análises, constatou-se que, apesar das diferenças nos percentuais de sombreamento e dos percentuais de redução de irradiação incidente encontrados em algumas combinações de orientação e cidades, a grande maioria dos sistemas fotovoltaicos são instalados de forma a tirar o melhor proveito da energia solar e, nestes casos, os valores tendem a ser coincidentes, tornando este método válido e confiável.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao financiamento desta pesquisa pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2015. Resolução Normativa nº 687, de 1 de março de 2015. In: Elétrica, A.N.d.E. (Ed.).
- Attia, S., Herde, A.d., 2010. Sizing Photovoltaic Systems during Early Design: A Decision Tool for Architects. 39th American Solar Energy Society (ASES) National Solar Conference (SOLAR), Phoenix, Arizona.
- Bahaj, A.S., James, P.A.B., 2007. Urban energy generation: The added value of photovoltaics in social housing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 2121-2136.
- Bazilian, M.D., Leenders, F., Van der Ree, B.G.C., Prasad, D., 2001. Photovoltaic cogeneration in the built environment. *Solar Energy* 71, 57-69.
- BIG, 2017. Capacidade de Geração do Brasil. ANEEL.
- Chivelet, N.M., 2010. Técnicas de Vedação Fotovoltaica na Arquitetura. Bookman, Porto Alegre.
- Costa, M., 2015. Aneel quer repetir sucesso das eólicas com energia solar.
- EPE, E.d.P.E., 2016. Balanço Energético Nacional 2016: Ano Base 2015. EPE, Rio de Janeiro.
- EPE, E.d.P.E., 2017. Balanço Energético Nacional 2017: Ano Base 2016. EPE, Rio de Janeiro.
- Frontini, F., Manfren, M., Tagliabue, L.C., 2012. A Case Study of Solar Technologies Adoption: Criteria for BIPV Integration in Sensitive Built Environment. *Energy Procedia* 30, 1006-1015.
- Martins, F.R., Rüther, R., Pereira, E.B., Abreu, S.L., 2008. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. *Energy Policy* 36, 2865-2877.
- Norton, B., Eames, P.C., Mallick, T.K., Huang, M.J., McCormack, S.J., Mondol, J.D., Yohanis, Y.G., 2010. Enhancing the performance of building integrated photovoltaics. *Solar Energy* 85, 1629-1664.
- NREL, 2017. U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017. In: Laboratory, N.R.E. (Ed.), Golden, CO.
- Rüther, R., Zilles, R., 2011. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. *Energy Policy* 39, 1027-1030.
- Zomer, C.D., 2014. Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 258.

APPLICATION AND EVALUATION OF A METHOD OF ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF PARTIAL SHADING IN ENERGY GENERATION OF SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS INTEGRATED TO BUILDINGS

Abstract. *Photovoltaic systems integrated to buildings inserted in urban areas tend to receive partial shading of both the surroundings and elements of the building itself, in addition to presenting limitations for the modules positioning. These facts compromise their energy generation. The objective of this research was to apply and evaluate the simplified method to determine an index that quantifies the energy losses due to partial shadowing in photovoltaic solar generators, presented in the author's doctoral thesis in order to enlarge the scope of previous work. The proposed method consists in identifying and quantifying shading on a surface, to relate the fraction of shaded area with the percentage of reduction of the global irradiation incident in the same period and to propose a shading index (IS) that translates the losses in the energy generation of systems partially shaded. In the thesis, the method was based on computational simulations for two horizontal surfaces in two locations: Florianópolis (27.48°S) and Singapore (1.04°N). In the present research, a new three-dimensional model was analyzed, containing five surfaces with different slopes and azimuthal deviations, common to urban buildings. The study was based on simulations using Ecotect software and climate databases from 10 cities made available by the U.S. Department of Energy. The selected cities are located in different latitudes, covering a representative network of cases. The results showed that, in most cases, the annual percentage of shading was very close to the reduction of irradiation incident in the plans due to the shading, thus validating the previously presented thesis.*

Key words: *Photovoltaic generation, partial shading in photovoltaic systems, Ecotect.*