

Avaliação da influência do contexto urbano na radiação solar para geração de energia

Evaluation of the influence of the urban context on the available solar radiation for energy generation

Evelise Leite Didoné^[a], Andreas Wagner^[b], Fernando Oscar RuttKay Pereira^[a]

^[a] Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil

^[b] Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Alemanha

Resumo

Este trabalho desenvolveu uma metodologia para avaliar a influência do contexto urbano na radiação solar para geração de energia com uso de módulos fotovoltaicos na envoltória de edifícios verticais. A metodologia foi baseada em simulações computacionais pelos programas Diva-for-Rhino e EnergyPlus. Duas cidades brasileiras com diferentes tipos de clima foram selecionadas para o estudo: Florianópolis e Fortaleza. Foram definidos diferentes contextos urbanos considerando edifícios com alturas iguais (Elevação Uniforme) e alturas variadas (Elevação Aleatória). Através da análise de radiação solar na superfície para aplicação dos módulos fotovoltaicos analisou-se a influência do sombreamento do entorno na geração de energia de diferentes tipos de edifícios de escritório. Na sequência, foram desenvolvidas estratégias para a aplicação dos módulos fotovoltaicos na envoltória através da análise detalhada da radiação solar disponível. Os resultados mostraram que o contexto uniforme é uma boa opção para edifícios com até 6 pavimentos, onde a área com maior potencial para geração de energia foi a coberta. Os contextos aleatórios apresentaram-se como melhor opção para aplicação de módulos fotovoltaicos nas fachadas dos edifícios mais altos.

Palavra-chave: Contexto urbano. Radiação solar. Geração de energia. Edifício vertical. Simulação computacional.

ELD é Arquiteta e Urbanista, Doutora, e-mail: evelise@arqnorm.com

AW é Professor, Doutor, e-mail: wagner@kit.edu

FORP é Professor, PhD., e-mail: ruttKay.pereira@ufsc.br



DOI: 10.1590/2175-3369.009.SUPL1.A0012 ISSN 2175-3369
Licenciado sob uma Licença Creative Commons

Abstract

In this work a methodology was developed to evaluate the influence of urban context on the usable solar radiation for energy generation through photovoltaic modules on building envelope. The methodology is based on computer simulations using the programs Diva-for-Rhino and EnergyPlus. Two Brazilian cities with different climate were selected for the study: Florianópolis and Fortaleza. Different urban contexts were defined considering buildings with uniform height (Uniform Context) and random height (Random Context). Through the analysis of solar radiation on the building envelope the influence of shading on energy generation for the different office building types was determined. In addition, strategies for PV application on building envelope through the detailed analysis of available solar radiation were developed. The results showed that within an uniform context PV modules are a good option for energy generation. For buildings up to 6 floors enough energy can be generated to achieve an equalized annual energy balance. For this context the area with highest potential for energy generation is the roof. For the random contexts the facades of the high-rise buildings are an interesting option for PV application as well.

Keyword: *Urban context. Solar radiation. Energy generation. High-rise building. Building simulation. Program.*

Introdução

As energias renováveis contribuem com 44% da matriz energética brasileira, sendo 82% provenientes das usinas hidroelétricas (MME, 2012). As hidroelétricas são baseadas em geração centralizada, com capacidade de crescimento limitada e as longas distâncias entre o centro de geração e os centros de consumo causam elevados custos e perdas de energia. Neste sentido, a energia solar pode ser utilizada como uma fonte complementar oferecendo produção local que ajuda na economia de água e diminui o uso dos combustíveis fósseis das usinas termelétricas. O Brasil recebe 1.013 MWh de radiação solar, equivalente a 50.000 vezes o consumo anual de eletricidade (MMA, 2014). Por este meio, os edifícios podem economizar e gerar energia e é possível chegar a um balanço energético nulo.

É grande a quantidade de edifícios que não utilizam de forma adequada os recursos naturais disponíveis. Muitos desses edifícios são projetados priorizando o seu valor estético, com características da arquitetura internacional, sendo inadequada ao clima local. A concepção de edifícios com consumo mínimo de energia exige a combinação de estratégias de construções adaptadas ao clima junto com as fontes de energias renováveis, como os módulos fotovoltaicos.

A grande disponibilidade de radiação solar no Brasil é um fator significante para o uso da energia solar e aplicação da tecnologia fotovoltaica (FV) no país (Rütter, 2004). Sistemas solares fotovoltaicos podem ser aplicados e/ou integrados no edifício e interligados à rede elétrica. Esta tecnologia vem se tornando uma alternativa promissora para o futuro. Entretanto, o ambiente urbano tem uma influência significativa no comportamento energético das edificações e alguns cuidados devem ser levados em consideração, já que parte da envoltória pode ser sombreada, reduzindo a eficiência dos módulos instalados.

Vários estudos comprovaram que o espaço urbano interfere significativamente no desempenho energético de edifícios quando comparados com espaços desobstruídos (Amado et al., 2012; Oke, 1988; Ratti et al., 2003; Stromann-Andersen & Sattrup, 2011; Terece et al., 2010). A radiação solar disponível no meio urbano é influenciada por diferentes parâmetros de densidade urbana, o que pode afetar o uso da energia nos diferentes pavimentos das edificações verticais (Stromann-Andersen & Sattrup, 2011). O efeito dos parâmetros do formato urbano, como largura das ruas, densidade, formas geométricas e orientação, na radiação solar dos edifícios já foi objeto de estudos e os resultados são facilmente encontrados na literatura (Cheng et al., 2006; Vanesch et al., 2012; Kanters & Horvat, 2012; Rendón, 2013;

Stromann-Andersen & Sattrup, 2011). Este trabalho desenvolveu uma metodologia para avaliar a influência do contexto urbano na radiação solar para geração de energia com uso de módulos fotovoltaicos na envoltória de edifícios verticais de escritório.

Metodologia

A metodologia foi baseada em simulações computacionais com o uso do programa computacional *Diva-for-Rhino* e do programa *EnergyPlus*. As avaliações foram realizadas para duas cidades brasileiras, representando diferentes zonas bioclimáticas. Fortaleza/CE, na zona bioclimática 8 está localizada próxima à linha do equador com clima tropical (latitude 3°78'S), é uma das cidades brasileiras com valores elevados de irradiação solar onde a média diária é de 5,67kWh/m². Florianópolis/SC, na zona bioclimática 3, situa-se no Sul do país (latitude 27°67'S) e apresenta os menores valores de irradiação solar, com média diária de 4,77kWh/m² (GESTE/PROMECC, 2013). Os arquivos climáticos utilizados nas simulações foram obtidos no site do Departamento de Energia dos EUA (U.S. DOE, 2012).

A metodologia foi dividida em diferentes partes: primeiro, foram selecionados 8 tipos de edifícios de escritório verticais. Segundo, foram definidos os diferentes contextos urbanos com propriedades geométricas variadas considerando edifícios com alturas iguais (Elevação Uniforme) e com alturas variadas (Elevação Aleatória). Na sequência, foi realizado um estudo para definir o nível mínimo de radiação solar na superfície para aplicação dos módulos fotovoltaicos na envoltória dos edifícios. Por

fim, a influência do sombreamento do entorno na geração de energia das diferentes tipologias de edifícios verticais foi analisada.

Definição do contexto urbano

O modelo urbano utilizado nas simulações foi definido de forma a representar diferentes cenários urbanos. O propósito foi modelar uma variedade de cenários urbanos, sem precisar configurar uma cidade existente, tornando possível a avaliação do desempenho energético dos edifícios e a influência de diferentes parâmetros da configuração urbana. Para as avaliações, oito tipos de edifícios verticais de escritório foram selecionados (Santana, 2006; Carlo, 2008; Melo, 2012). Eles foram inseridos no contexto urbano a fim de avaliar o impacto causado pelo entorno na radiação solar disponível em suas fachadas.

Para cada tipo de edifício foi considerado um modelo uniforme constante de plano urbano em planta. Isso significa que o plano urbano e o espaçamento entre os edifícios, como pode ser visto na Figura 1 (a), permanece o mesmo para todas as simulações de cada tipo de edifício. Ao mesmo tempo, dois diferentes tipos de distribuição de altura dos edifícios foram definidos: a Elevação Uniforme e a Elevação Aleatória, como ilustrado nas Figura 1 (b) e Figura 1 (c), respectivamente. Apesar da Elevação Aleatória no plano urbano ser a mais recomendada para o planejamento urbano de cidades com alta densidade de radiação solar, a Elevação Uniforme é mais frequente nas cidades atuais (Cheng et al., 2006).

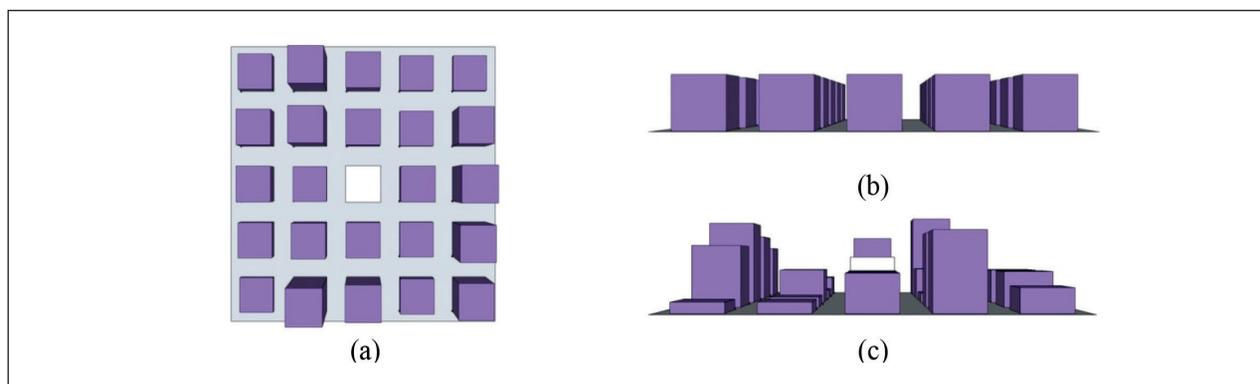


Figura 1 - (a) Contexto urbano uniforme em planta; (b) Elevação Uniforme e (c) Elevação Aleatória.

Fonte: elaborada pelos autores.

O contexto urbano foi representado por 25 edifícios, formando uma malha de 5 x 5 edifícios regularmente distribuídos. Apenas o edifício no centro da malha, marcado em branco na Figura 1 (a), foi analisado. Para definir a densidade urbana, foi utilizada uma taxa de ocupação de 40%, definido de acordo com o código de obras das cidades em estudo (Prefeitura de Fortaleza, 2009; Prefeitura de Florianópolis, 1998). A taxa de densidade urbana foi calculada dividindo a área de projeção da edificação pela área do terreno.

O coeficiente de aproveitamento, definido como a razão entre a área total do edifício pela área do terreno, foi fixada para o contexto com Elevação Uniforme, mas varia para o contexto com Elevação Aleatória conforme a altura do edifício (número de

pavimentos). A altura do edifício é um dos parâmetros que mais influencia a disponibilidade da luz natural e radiação solar nas fachadas dentro de um contexto urbano (Littlefair, 1998).

Casos com elevação aleatória

Como a distribuição e a altura do entorno dos edifícios tem um grande impacto no desempenho das edificações, um número de 10 diferentes contextos aleatórios foram utilizados para cada tipo de edifício. Os contextos aleatórios foram gerados por meio da função de número aleatório do Excel. As alturas dos edifícios do entorno foram determinadas pelas alturas dos tipos de edifícios selecionados.

Tabela 1 - Alturas utilizadas no contexto urbano com Elevação Aleatória.

Edifício	Caso									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	29.1	52.3	13.7	44.6	21.4	36.9	21.4	36.9	52.3	29.1
2	44.6	6.0	44.6	60.0	29.1	6.0	21.4	52.3	6.0	13.7
3	29.1	21.4	21.4	6.0	21.4	36.9	6.0	52.3	44.6	44.6
4	21.4	29.1	6.0	36.9	44.6	44.6	52.3	13.7	44.6	29.1
5	13.7	21.4	6.0	44.6	60.0	13.7	36.9	44.6	52.3	60.0
6	60.0	52.3	36.9	44.6	6.0	29.1	21.4	44.6	52.3	44.6
7	29.1	13.7	6.0	36.9	6.0	52.3	6.0	29.1	13.7	21.4
8	29.1	44.6	21.4	21.4	29.1	44.6	36.9	13.7	44.6	6.0
9	52.3	6.0	44.6	44.6	36.9	6.0	60.0	13.7	29.1	60.0
10	60.0	60.0	21.4	6.0	36.9	60.0	13.7	44.6	6.0	60.0
11	60.0	44.6	21.4	52.3	21.4	44.6	44.6	36.9	44.6	60.0
12	13.7	13.7	6.0	21.4	52.3	13.7	44.6	29.1	44.6	52.3
13	29.1	60.0	36.9	52.3	60.0	13.7	60.0	6.0	29.1	44.6
14	13.7	21.4	52.3	6.0	21.4	44.6	29.1	60.0	44.6	21.4
15	36.9	52.3	44.6	60.0	44.6	13.7	13.7	44.6	36.9	44.6
16	6.0	29.1	6.0	36.9	60.0	36.9	60.0	29.1	60.0	29.1
17	21.4	6.0	13.7	52.3	29.1	21.4	44.6	6.0	52.3	52.3
18	21.4	21.4	21.4	6.0	60.0	36.9	52.3	36.9	60.0	29.1
19	52.3	6.0	13.7	52.3	44.6	29.1	21.4	52.3	44.6	21.4
20	21.4	6.0	6.0	60.0	52.3	21.4	44.6	13.7	52.3	52.3
21	6.0	13.7	60.0	60.0	60.0	21.4	52.3	21.4	29.1	52.3
22	21.4	29.1	44.6	21.4	36.9	21.4	36.9	21.4	60.0	60.0
23	6.0	52.3	13.7	21.4	6.0	21.4	13.7	21.4	60.0	29.1
24	21.4	21.4	36.9	36.9	44.6	60.0	44.6	52.3	52.3	60.0

Fonte: elaborada pelos autores.

A Tabela 1 descreve os 10 casos que foram utilizados para a simulação dos contextos urbanos para todos os modelos, bem como as alturas utilizadas para os 24 edifícios vizinhos. O número do edifício na coluna 1 da tabela é equivalente a posição do edifício de acordo com a planta mostrada na Tabela 2 com as posições dos edifícios.

Tabela 2 - Posição dos edifícios no plano urbano.

1	2	3	4	5
10	9	8	7	6
11	12	13	14	15
19	18	17	16	15
20	21	22	23	24

Fonte: elaborada pelos autores.

Protótipos para simulação

Utilizando o contexto com Elevação Uniforme e os 10 contextos com Elevação Aleatória, foram modelados 88 cenários urbanos. Adicionalmente, foram avaliadas duas diferentes orientações, na qual as maiores fachadas dos edifícios foram voltadas para Norte-Sul e para Leste-Oeste, para as cidades de Florianópolis e Fortaleza, totalizando 352 simulações. A Figura 2 apresenta os oito tipos de edifícios em um dos contextos com Elevação Aleatória.

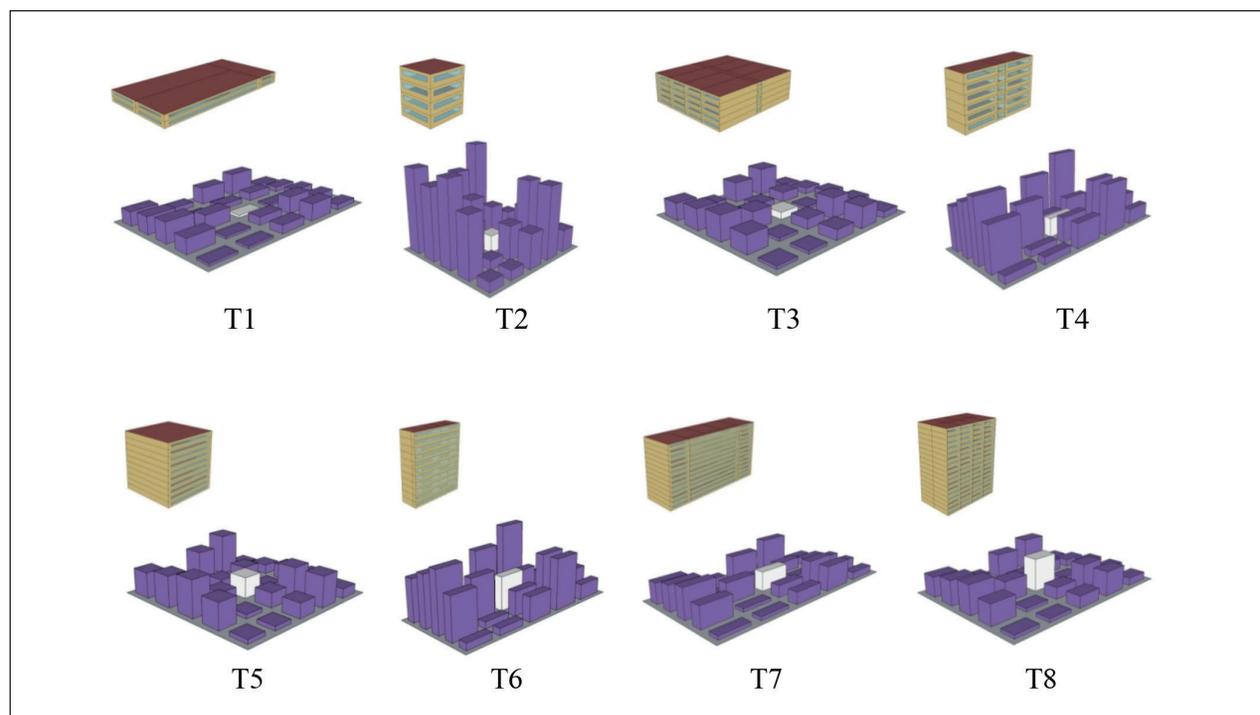


Figura 2 - Exemplo dos tipos de edifícios dentro de um dos contextos urbanos com elevação aleatória.

Fonte: elaborada pelos autores.

As dimensões dos terrenos dos edifícios e do layout urbano para cada tipo de edifício foram organizadas e calculadas por meio da metodologia de planejamento energético urbano desenvolvida por (Marins & Roméro, 2012). Foi utilizado o tipo de edifício e características, como a área de piso, para calcular o tamanho do terreno e a quadra da cidade. A Tabela 3 apresenta as dimensões do contexto

urbano para a taxa de ocupação de 40%. Vale ressaltar que, como a área do terreno é fixa para cada tipo de edifício, os diferentes tipos possuem diferentes distâncias entre os edifícios vizinhos, que é uma das variáveis de maior peso na disponibilidade de radiação solar no cenário urbano (Vanesch et al., 2012). Neste trabalho, a distância entre os edifícios foi considerada a mesma para todas as direções.

Tabela 3 - Parâmetros do contexto urbano para taxa de ocupação de 40%.

Tipo	Área de piso do edifício em m ²	Área do terreno em m ²	Distância entre edifícios em m	Coefficiente de aproveitamento
T1	3200	8000	32	0.8
T2	90	225	6	1.6
T3	2250	5625	28	2.0
T4	200	500	7	2.4
T5	900	2250	17	4.0
T6	200	500	7	4.4
T7	1360	3400	19	5.2
T8	1500	3750	22	6.8

Fonte: elaborada pelos autores.

Simulação da radiação solar na envoltória

A radiação solar na envoltória foi obtida por meio de simulação computacional com os programas Rhinoceros e Radiance pelo plugin Diva-for-Rhino Rhino (Jakubiec & Reinhart, 2011). A análise foi realizada para todo o ano através do arquivo climático das cidades em estudo. Foram construídos modelos 3D com superfícies planas, representando a volumetria dos edifícios e do contexto urbano. A malha de pontos foi distribuída uniformemente sobre todas as superfícies do edifício central como mostrado na Figura 3. Os pontos da malha foram posicionados com 0,50 m de afastamento entre si. Os resultados obtidos são expressos em kWh / (m² ano).

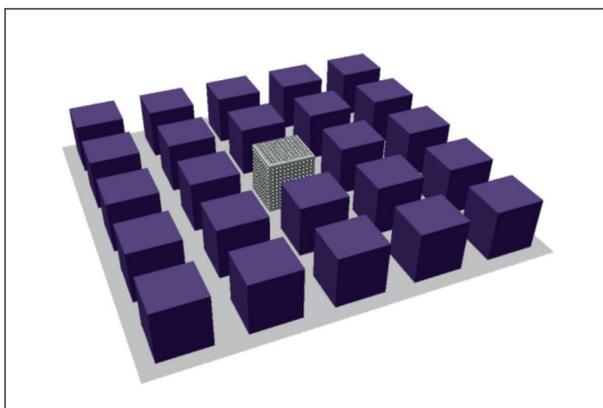


Figura 3 - Distribuição dos pontos de análise na fachada do edifício.

Fonte: elaborada pelos autores.

A refletância das paredes exteriores e coberta foi ajustada em 0,75, valor utilizado em edifícios com envoltória energeticamente eficiente. Nas

superfícies dos edifícios vizinhos foi adotada refletância de 0,35 e para o piso 0,20. Para os parâmetros do Radiance e da densidade geométrica, os valores padrões do Diva foram utilizados.

Radiação solar requerida para a instalação de placas fotovoltaicas

Para determinar os locais apropriados para a instalação de painéis fotovoltaicos na envoltória, um nível mínimo de radiação solar foi definido com base em considerações econômicas (Jakubiec & Reinhart, 2012). Em geral, um prazo de amortização da metade do tempo de vida útil dos painéis pode ser considerado como um requisito mínimo para um investimento econômico interessante (Scheuring, 2006). A vida útil do fotovoltaico monocristalino é cerca de 30 anos e dos módulos de película fina (orgânicos) entre 20 e 25 anos. Tendo em vista os custos com eletricidade e instalação do sistema, pode-se estimar um valor de radiação solar mínima para a instalação dos módulos.

No Brasil as instalações fotovoltaicas custavam em 2013 cerca de R\$ 7000 por kWp (América do Sol, 2004; Montenegro, 2013). O custo da eletricidade depende da cidade e do tipo de uso da edificação, onde a média encontrada para edifícios comerciais foi de R\$ 0,27 por kWh (ANEEL, 2014). Considerando uma taxa de inflação de 5,2% (valor médio 2003-2013) (Abdala, 2012) e uma redução nos custos de instalação de 60% até 2020, o preço da energia para os próximos anos foi calculado (Portal Energia, 2014).

Com os custos de instalação de 2013, o nível de radiação solar mínimo necessário para instalação dos módulos fotovoltaicos na envoltória foi de 1000 kWh / (m² ano) para um retorno simples, considerando os custos de investimento ao longo de um período de 15 anos. No entanto, tendo em vista a redução de 60% dos custos de instalação até 2020 (R\$ 4200) uma radiação solar de aproximadamente 800 kWh / (m² ano) é suficiente para um retorno dentro de 10 anos, que é o valor que foi considerado neste trabalho como limite para aplicação dos módulos fotovoltaicos. O cálculo simplificado não considerou os custos de capital e de manutenção. Para determinar a rentabilidade de um sistema real, recomenda-se um cálculo incluindo estes fatores.

A Equação (1) determina o período de retorno para um sistema solar específico (Hay, 2013). Em que TP é o período de retorno; CTP é o custo total do projeto instalado; EEP é a estimativa da eletricidade produzida anualmente em kWh; e PR é o preço da rede por kW.

$$T_p = \frac{CTP}{EEP \times PR}$$

Análise da radiação solar

Os resultados obtidos foram dispostos em tabelas para a análise da radiação solar em cada superfície e nos vários pavimentos separadamente. A Tabela 4 apresenta a organização para a análise dos dados. As colunas (#0 a #10) apresentam os contextos urbanos. O contexto urbano #0 possui a Elevação Uniforme e #1 a #10 possuem as Elevações Aleatórias; as linhas da tabela correspondem aos pavimentos dos edifícios em todas as orientações. As células marcadas em cinza mostram as superfícies onde a radiação solar média atingiu o nível mínimo exigido de 800 kWh / (m² ano).

Tabela 4 - Radiação solar média para cada pavimento e superfície em kWh/(m² ano) do edifício T3 - Norte-Sul.

Orientação/ Pavimento	Superfície	Caso										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Norte	Telhado	1630	1568	1481	1581	1515	1439	1545	1415	1596	1496	1456
	5	973	736	635	844	790	779	581	584	888	611	832
	4	948	708	575	823	769	750	524	571	879	551	821
	3	925	627	543	802	743	672	490	557	867	519	810
	2	904	566	537	776	713	613	482	528	853	507	793
Leste	1	881	554	529	748	683	604	475	472	839	500	781
	5	828	609	445	568	434	440	689	439	722	591	483
	4	798	568	427	545	421	423	668	421	707	551	454
	3	755	529	411	517	399	414	627	412	691	509	441
	2	700	500	383	490	374	387	596	385	665	483	426
Sul	1	655	471	366	459	345	370	558	370	637	460	404
	5	423	381	394	390	321	296	366	290	393	292	313
	4	407	369	385	381	313	288	353	282	384	286	304
	3	387	351	367	365	301	276	337	271	368	275	293
	2	363	331	345	344	285	261	317	255	347	261	278
Oeste	1	331	303	315	315	260	238	290	233	317	237	254
	5	824	627	732	763	654	428	722	407	617	477	385
	4	796	605	714	745	623	416	708	376	581	444	373
	3	753	584	684	723	573	396	679	360	545	429	354
	2	702	556	663	698	528	371	658	345	518	410	337
1	656	529	636	671	492	344	631	327	486	390	312	

Fonte: elaborada pelos autores.

A aplicação dos painéis fotovoltaicos na envoltória foi restrita devido as condições técnicas e econômicas. Nem todos os edifícios possuem liberdade para aplicação dos painéis fotovoltaicos em qualquer superfície, já que muitos estão situados no meio urbano, onde sombreamento e obstáculos devem ser considerados. Através dos resultados obtidos na análise de radiação solar, os locais de aplicação dos painéis fotovoltaicos podem ser melhor definidos. Para os modelos com a Elevação Aleatória, contexto urbano que oferece mais possibilidades, apenas um dos 10 contextos foi escolhido como referencial para a aplicação de módulos fotovoltaicos.

Análise da geração de energia

Para o cálculo da geração de energia foi utilizado o programa *EnergyPlus*. O programa faz simulação térmica e energética de edifícios e fornece dados de consumo final e geração de energia com módulos fotovoltaicos (Crawley, 2001; Energyplus, 2014).

EnergyPlus oferece três algoritmos matemáticos diferentes para o cálculo da eletricidade produzida por um painel fotovoltaico. Os algoritmos são: simples, um-diodo equivalente e Sandia (Energyplus, 2012). Para este estudo foi utilizado o objeto simples, que é útil no cálculo da geração anual de energia na fase de projeto. O programa calcula a radiação solar incidente dependendo da inclinação do módulo e orientação, considerando sombreamento e reflexões.

A influência do sombreamento do entorno na energia gerada foi avaliada para os 8 diferentes tipos de edifícios de escritório vertical. A aplicação dos módulos fotovoltaicos foi restrita devido às condições técnicas e econômicas já apresentadas. Os edifícios sem obstáculos do entorno oferecem total liberdade para aplicação de painéis fotovoltaicos em qualquer lugar desejável de acordo com sua localização e orientação. No meio urbano isso não é viável, sendo necessário considerar o sombreamento das obstruções existentes. Por meio dos resultados obtidos com a análise de radiação solar, foi possível definir os locais para a aplicação dos módulos fotovoltaicos.

Diversas tecnologias fotovoltaicas foram escolhidas para serem utilizadas na envoltória do edifício. As células solares selecionadas de módulos cristalino (m-Si) e filme fino (CIS) possuem os maiores valores de eficiência disponível no mercado. Os painéis de m-Si, com eficiência de 20,1%, foram utilizados na cobertura e o CSI, com eficiência de 13%, nas fachadas e proteções solares. A célula fotovoltaica orgânica (OPV), com eficiência de 3%, foi selecionada devido a sua característica semitransparente homogênea e seu alto potencial para integração na janela (Colsmann et al., 2011). Além disso, as células solares orgânicas encapsuladas apresentam potencial de baixos custos de produção e em breve estarão disponíveis no mercado. A escolha por uma nova tecnologia tem o intuito de inovar com a avaliação do seu potencial para futuras aplicações. A Tabela 5 apresenta mais detalhadamente as tecnologias fotovoltaicas utilizadas.

Tabela 5 - Características dos módulos fotovoltaicos.

		Dados do fabricante						Calculado
Aplicação	Tecnologia	Fabricante	Modelo	Área do módulo [m ²]	Power [W]	EFFSTC [%]	ktemp [%/°C]	EFFNOCT [%]
Cobertura	m-Si	Sunpower	SPR-435-NE-WHT-D	2.16	435	20.1	-0.38	18.6
Fachada/ Prot. solar	CIS	Solar Frontier	SF-160-S	1.2	160	13	-0.31	12.2
Janela	Orgânico (OPV)	Laboratório	-	-	-	3	+0.05	-

Fonte: elaborada pelos autores.

Na cobertura, os módulos foram aplicados com inclinação de 27° em Florianópolis e 3° em Fortaleza (a inclinação igual à latitude local proporciona altos valores de radiação solar no módulo). Em ambos os casos, os módulos da cobertura foram orientados a Norte. Nas fachadas e janelas os módulos fotovoltaicos foram analisados com uma inclinação de 90°, ou seja, no mesmo plano da fachada. Já nas proteções solares, os painéis foram aplicados na horizontal (inclinação de 0°), a mesma da proteção solar.

Em relação aos diferentes contextos urbanos, para os modelos com distribuição de altura uniforme, a

colocação dos módulos fotovoltaicos foi definida de acordo com o nível de radiação solar existente. Para os modelos com alturas aleatórias, o contexto urbano que ofereceu mais possibilidades para aplicação dos módulos fotovoltaicos foi escolhido como contexto base para aplicação dos módulos.

A Figura 4 exemplifica os 11 contextos urbanos de um tipo de edifício. O contexto Elevação Uniforme está marcado em azul e contexto Elevação Aleatória selecionado como referencial, com o maior número de superfícies (pavimentos) que atingiu o nível mínimo para aplicação fotovoltaica está marcado em laranja.

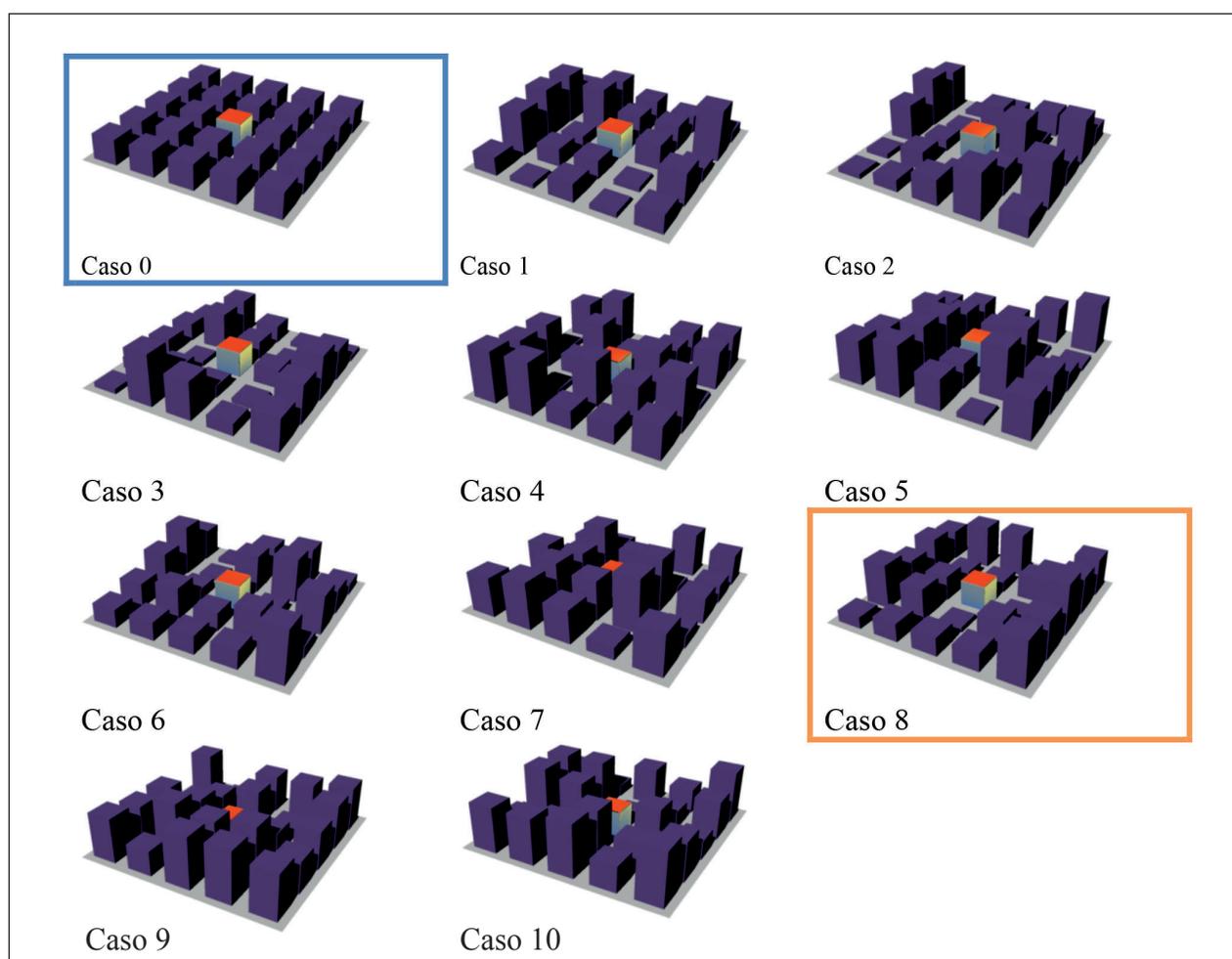


Figura 4 -Exemplo dos contextos selecionados para aplicação do fotovoltaico.

Fonte: elaborada pelos autores.

Resultados

A influência do sombreamento dos edifícios vizinhos na incidência da radiação solar para a geração

energia fotovoltaica foi investigada e os resultados estão discutidos nesta seção.

Radiação solar na envoltória dos edifícios

A radiação solar média para as superfícies voltadas para Norte, Sul, Leste e Oeste, sem considerar o entorno, nas cidades de Florianópolis e Fortaleza estão apresentadas na Figura 5. Ambas as cidades possuem baixa latitude geográfica (Florianópolis 27° e Fortaleza 3°), assim, o ângulo de elevação do sol é alto ao longo de todo o ano, o que resulta em uma grande diferença no valor de radiação solar obtido na cobertura e na fachada.

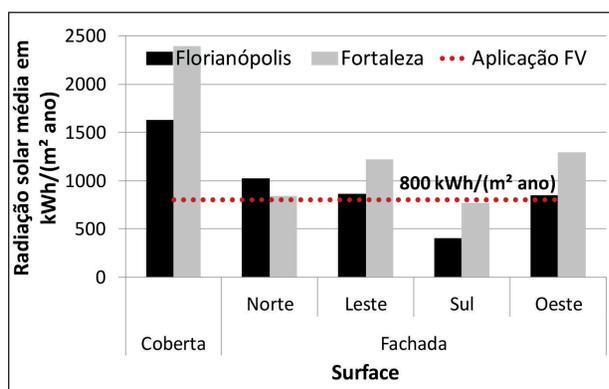


Figura 5 - Radiação Solar média na superfície sem entorno (dado referencial)¹.

Fonte: elaborada pelos autores.

Os resultados mostrados na Figura 5 apresentam a radiação solar máxima possível para cada superfície.

Este valor pode ser utilizado para comparações com os resultados obtidos considerando o entorno do contexto urbano. As colunas mostram a radiação solar nas fachadas com diferentes orientações e na cobertura, para as cidades de Florianópolis e Fortaleza. A linha tracejada apresenta a radiação solar mínima necessária para a aplicação de módulos fotovoltaicos na superfície.

Observa-se que a cobertura é a superfície com a maior exposição à radiação solar do edifício. As fachadas recebem valores de radiação menores, variando de acordo com a orientação. As fachadas orientadas para Leste e Oeste possuem valores semelhantes nas duas cidades, com cerca de 50% a menos do valor de radiação solar da cobertura. As maiores diferenças aparecem nas orientações norte e sul. Florianópolis tem cerca de 25% a mais de radiação solar, na fachada Norte, do que Fortaleza.

Através dos resultados da radiação solar obtidos para todas as superfícies, considerando o contexto urbano nas duas cidades, foi possível definir as orientações e os pavimentos dos diferentes tipos de edifícios que receberiam os módulos fotovoltaicos. As Tabelas 6 e 7 apresentam onde os módulos fotovoltaicos podem ser aplicados, de acordo com o valor de radiação solar mínima definido. Os pavimentos para aplicação dos módulos estão apresentados nas tabelas pelos números, por exemplo, 4_3 significa que os módulos seriam colocados na fachada do 3° e do 4° pavimento.

Tabela 6 - Síntese da aplicação dos módulos fotovoltaicos de acordo com o nível de radiação solar para os edifícios com as maiores fachadas orientadas Norte-Sul.

Cidade	Florianópolis_Norte-Sul						Fortaleza_Norte-Sul						
	Tipo	Contexto Urbano	Coberta	Pavimento				Contexto Urbano	Coberta	Pavimento			
				N	L	S	O			N	L	S	O
T1	0	Sim	2_1	2_1	-	2_1	0	Sim	2_1	2_1	-	2_1	
	8	Sim	2_1	-	-	-	6	Sim	-	2_1	-	2_1	
T2	0	Sim	4	-	-	-	0	Sim	-	4_3	-	4_3	
	3	Sim	-	-	-	-	3	Sim	-	-	-	4	
T3	0	Sim	5_1	5	-	5	0	Sim	5	5_1	-	5_1	
	8	Sim	5_1	-	-	-	6	Sim	-	5_1	-	5_1	

(Continua)

¹ A radiação solar média é a média do resultado obtido em todos os pontos da superfície.

(Conclusão)

T4	0	Sim	6	-	-	-	0	Sim	-	6_4	-	6_4
	3	Sim	-	-	-	-	3	Sim	-	-	-	6_3
T5	0	Sim	10_8	-	-	-	0	Sim	-	10_7	-	10_7
	8	Sim	10_5	-	-	-	3	Sim	-	10_4	-	10_1
T6	0	Sim	11	-	-	-	0	Sim	-	11_10	-	11_9
	3	Sim	11_9	-	-	-	3	Sim	-	-	-	11_3
T7	0	Sim	13_11	-	-	-	0	Sim	-	13_8	-	13_8
	3	Sim	13_6	13	-	13	6	Sim	-	13_2	-	13_2
T8	0	Sim	17_15	-	-	-	0	Sim	-	17_14	-	17_14
	3	Sim	17_5	17_11	-	17_10	3	Sim	17_11	17_6	-	17_1

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 7 - Síntese da aplicação dos módulos fotovoltaicos de acordo com o nível de radiação solar para os edifícios com as maiores fachadas orientadas Leste-Oeste.

Tipo	Florianópolis_Leste-Oeste							Fortaleza_Leste-Oeste						
	Contexto Urbano	Coberta	Pavimento				Contexto Urbano	Coberta	Pavimento					
			N	L	S	O			N	L	S	O		
T1	0	Sim	2_1	2_1	-	2_1	0	Sim	2_1	2_1	-	2_1		
	8	Sim	2_1	-	-	-	6	Sim	-	2_1	-	2_1		
T2	0	Sim	4	-	-	-	0	Sim	-	4_3	-	4_3		
	3	Sim	-	-	-	-	3	Sim	-	-	-	4		
T3	0	Sim	5_1	5	-	5	0	Sim	5	5_1	-	5_1		
	8	Sim	5_1	-	-	-	6	Sim	-	5_1	-	5_1		
T4	0	Sim	6_5	-	-	-	0	Sim	-	6_5	-	6_5		
	3	Sim	-	-	-	-	3	Sim	-	-	-	6_4		
T5	0	Sim	10_8	-	-	-	0	Sim	-	10_7	-	10_7		
	8	Sim	10_5	-	-	-	3	Sim	-	10_4	-	10_1		
T6	0	Sim	11_10	-	-	-	0	Sim	-	11_10	-	11_10		
	3	Sim	-	-	-	-	3	Sim	-	-	-	11_4		
T7	0	Sim	13_10	-	-	-	0	Sim	-	13_9	-	13_9		
	3	Sim	13_7	-	-	13_9	6	Sim	-	13_4	-	13_4		
T8	0	Sim	17_15	-	-	-	0	Sim	-	17_14	-	17_14		
	3	Sim	17_5	17_12	-	17_7	6	Sim	17_16	17_1	-	17_1		

Fonte: elaborada pelos autores.

De acordo com os resultados observa-se que os contextos urbanos com Elevação Aleatória #3 e #8 foram os que permitiram maior incidência de radiação solar nas fachadas dos edifícios. Os edifícios mais altos, com maior número de pavimentos, obtiveram mais radiação solar na fachada, sendo esta superfície uma boa opção para aplicação da tecnologia. O edifício T8 situado em Fortaleza com orientação Leste-Oeste possui toda a superfície da fachada Leste e Oeste propícia para geração de energia solar. Já os edifícios mais baixos apresentam a cobertura e os pavimentos mais altos como melhores áreas para aplicação no contexto com Elevação Uniforme (#0).

Aplicação de módulos fotovoltaicos na envoltória do edifício

A aplicação dos módulos fotovoltaicos na envoltória foi definida pelos níveis de radiação solar obtidos nas superfícies de acordo com a influência do entorno. As Tabelas 8 e 9 apresentam de forma detalhada a aplicação dos módulos nas superfícies dos diferentes tipos de edifícios, cidades e orientações, bem como, para o contexto com altura uniforme (#0) e o contexto com altura aleatória selecionado (#1 a #10). A cor cinza marca as superfícies e orientações onde tem aplicação de fotovoltaico e os números dos pavimentos onde as aplicações foram realizadas.

Tabela 8 - Aplicação de fotovoltaico para cada tipo de edifício em Florianópolis.

Tipo	Contexto urbano	Fachada				Proteção solar				Janela
		N	L	S	O	N	L	S	O	
T1_NS	0									
	8					4				
T2_NS	0									
	3									
T3_NS	0	5_1					5		5	5_1
	8	5_1								5_1
T4_NS	0					6				
	3									
T5_NS	0					10_8				
	8					10_5				
T6_NS	0									11
	3									11_9
T7_NS	0					13_11				13_11
	3		13		13	13_6				13_6
T8_NS	0					17_15				
	3		17_11		17_10	17_5				
T1_LO	0									
	8									
T2_LO	0					4				
	3									
T3_LO	0					5_1				
	8		5		5	5_1				5
T4_LO	0	6_5								
	3									

(Continua)

(Conclusão)

T5_LO	0	10_8									
	8	10_5									
T6_LO	0	11_10									
	3										
T7_LO	0	13_10									
	3	13_7						13_9	13_9		
T8_LO	0	17_15									
	3	17_5					17_12		17_7		

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 9 - Aplicação de fotovoltaico para cada tipo de edifício em Fortaleza.

Tipo	Contexto urbano	Coberta	Fachada				Proteção solar				Janela
			N	L	S	O	N	L	S	O	
T1_NS	0										
	6										
T2_NS	0							4_3		4_3	
	3									4	
T3_NS	0		5					5_1		5_1	5
	6							5_1		5_1	
T4_NS	0			6_4		6_4					
	3					6_3					
T5_NS	0			10_7		10_7					
	3			10_4		10_1					
T6_NS	0			11_10		11_9					
	3					11_3					
T7_NS	0			13_8		13_8					
	6			13_2		13_2					
T8_NS	0			17_14		17_14					
	3			17_6		17_1	17_11				
T1_LO	0										
	6										
T2_LO	0							4_3		4_3	
	3									4	
T3_LO	0			5_1		5_1	5				5_1
	6			5_1		5_1					5_1
T4_LO	0							6_5		6_5	
	3									6_4	
T5_LO	0							10_7		10_7	
	3							10_4		10_1	
T6_LO	0							11_10			11_10
	3										11_4
T7_LO	0							13_9		13_9	13_9
	6							13_4		13_4	13_4
T8_LO	0							17_14		17_14	
	6		17_16					17_1		17_1	

Fonte: elaborada pelos autores.

Para a maioria dos diferentes tipos de edifícios menos módulos fotovoltaicos foram aplicados na envoltória do contexto aleatório. Essa redução foi devido ao baixo nível de radiação solar nas superfícies verticais. Apesar da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos poder ser gerada por baixos níveis de radiação solar, o preço dos módulos ainda é alto e o *payback* (tempo de retorno do investimento) não compensa a instalação.

Para os edifícios do tipo T1, a aplicação do fotovoltaico permaneceu a mesma em todos os casos, já que os módulos foram aplicados apenas na cobertura. Para os tipos T2, T3 e T4, os edifícios com altura mediana, mais fotovoltaicos foram utilizados na cobertura do que na fachada. A cobertura é a superfície com os maiores níveis de radiação solar, o que explica os altos valores de energia gerada no layout uniforme. Nos edifícios mais altos, uma grande quantidade de fotovoltaico foi instalada nas superfícies verticais (fachada). Para esse tipo de edifício o layout aleatório

apresenta valores mais altos do que o layout uniforme já que os edifícios do entorno possuem alturas mais baixas.

Energia gerada pelos módulos fotovoltaicos no contexto urbano

A influência do sombreamento na energia gerada pelos módulos fotovoltaicos na envoltória dos edifícios foi avaliada e os resultados estão apresentados na sequência. As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados obtidos para Florianópolis e Fortaleza do layout com Elevação Uniforme e do layout com Elevação Aleatória que apresentou níveis de radiação solar mais elevado. A energia gerada nos diferentes layouts está apresentada nas colunas e os pontos pretos apresentam a diferença entre os dois layouts, sendo positivo a maior porcentagem para Elevação Uniforme e negativo a maior porcentagem para a Elevação Aleatória.

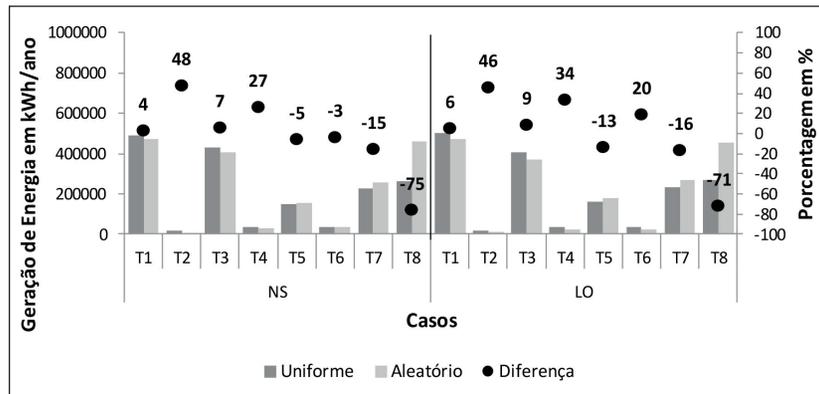


Figura 6 - Energia gerada para os os diferentes tipos de edifícios na cidade de Florianópolis com orientação Norte-Sul (NS) e Leste-Oeste (LO).
Fonte: Elaborada pelos autores.

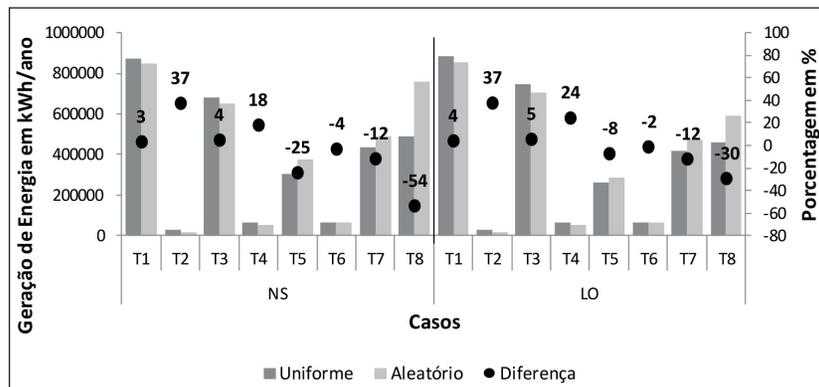


Figura 7 - Energia gerada para os os diferentes tipos de edifícios na cidade de Fortaleza com orientação Norte-Sul (NS) e Leste-Oeste (LO).
Fonte: Elaborada pelos autores.

Como esperado, os valores de energia gerada seguiram os níveis de radiação solar disponível nas superfícies. Sendo assim, edifícios com maiores níveis de radiação solar disponível na envoltória geraram mais energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos. O comportamento foi similar para ambas as cidades e orientações avaliadas nos dois contextos, alterando apenas a quantidade da energia gerada. Em alguns modelos o valor de energia gerada em Fortaleza é praticamente o dobro do valor gerado em Florianópolis.

Em relação aos tipos de edifícios, as diferenças foram maiores. Sendo que os tipos com menos pavimentos geraram mais energia no contexto Elevação Uniforme e os tipos com mais pavimentos no contexto com Elevação Aleatória. O tipo T2 apresentou uma maior geração de energia no contexto Elevação Uniforme com uma diferença de 48% e 46% em Florianópolis e 37% em Fortaleza. Já o tipo T8 gerou mais energia no contexto Elevação Aleatória, sendo 75% e 71% a mais de energia gerada em relação ao contexto Elevação Uniforme para Florianópolis e 54% e 30% para Fortaleza. O tipo T1 teve pouca alteração devido a instalação dos módulos terem sido apenas na cobertura.

Conclusão

Este artigo apresentou a influência do sombreamento provocado pelo contexto urbano na envoltória de edifícios de escritórios verticais. A influência foi diferente para o contexto com Elevação Uniforme e com Elevação Aleatória. Tipos de edifícios com altura mediana (6 pavimentos) apresentaram mais possibilidade de geração de energia no traçado urbano com Elevação Uniforme. O traçado urbano com Elevação Aleatória, se mostrou favorável para os tipos mais altos com mais áreas para a instalação, onde os edifícios vizinhos têm no máximo a mesma altura do edifício avaliado. Neste caso, as superfícies verticais (fachadas) obtiveram maiores níveis de radiação solar. A separação entre os edifícios (largura da rua) foi também um fator significativo para a avaliação da radiação solar sobre as superfícies dos edifícios.

O sombreamento influencia a disponibilidade de radiação solar na envoltória dos edifícios e pode reduzir a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos

aplicados no envelope. O valor mínimo de radiação solar definido para aplicação fotovoltaica pode ser alterado de acordo com os custos de instalação e limitação técnica. Valores limite de radiação diferente para cobertura e fachadas pode ser satisfatório, uma vez que as aplicações integradas no edifício reduzem custo quando substitui outros materiais.

Agradecemos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pelo suporte financeiro.

Referências

- Abdala, V. (2012). Inflação oficial - Comunica, Agência Brasil. *Empresa Brasil de comunicação*. Recuperado em 04 de abril de 2014, de <http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2013-01-10/inflacao-oficial-fecha-ano-de-2012-em-584-diz-ibge>.
- Amado, M, Poggi, F, Miguel A., & Francesca P. (2012). Towards Solar Urban Planning: A New Step for Better Energy Performance. *Energy Procedia*, 30, 1261–1273. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.139>.
- América do Sol. (2004). Custos. Recuperado em 07 de julho de 2014, de www.americadosol.org/custos.
- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. (2014). *Soma de tarifa média de fornecimento - Classe de consumo*. Recuperado em 07 de novembro de 2014, de www.aneel.gov.br.
- Carlo, J. C. (2008). *Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética da Envoltória de Edificações Não Residenciais* (Doutorado em Engenharia Civil). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis.
- Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., & Compagnon, R. (2006). *Urban Form, Density and Solar Potential*. Pleaa 2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture. Geneva, 6-8.
- Colsmann, A., Puetz, A., Bauer, A., Hanisch, J., Ahlswede, E., & Lemmer, U. (2011). Efficient Semi-Transparent Organic Solar Cells with Good Transparency Color Perception and Rendering Properties. *Advanced Energy Materials*, 599-603. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201000089>.

- Crawley, D. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6).
- Energyplus. (2012). Input Output Reference. Recuperado em 20 de janeiro de 2012, de: www.energyplus.gov
- EnergyPlus. (2014). Energy Simulation Software. U.S. Department of Energy. Recuperado em 08 de abril de 2014, de <http://apps1.eere.energy.gov>
- Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos – GESTE e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC (2013). RADIASOL 2. Laboratório de Energia Solar.
- Hay, F. J. (2013). Economics of Solar Photovoltaic Systems. NebGuide. University of Nebraska. *Lincoln Extension*. Recuperado em 07 de novembro de 2016, de <http://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/g2182.pdf>
- Jakubiec, J. A., & Reinhart, C. (2011). DIVA 2.0: Integrating Daylight And Thermal Simulations Using Rhinoceros 3D, DaySim And EnergyPlus. In 12th International IBPSA Conference, Building Simulation 2011 (p. 2202-2209). Sydney: IBPSA. Recuperado em 07 de novembro de 2016, de http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2011/p_1701.pdf
- Jakubiec, J. A., & Reinhart, C. (2012). Towards validated urban photovoltaic potential and solar radiation maps based on lidar measurements, gis data, and hourly daysim simulations. In *SimBuild 2012 - Fifth National Conference of IBPSA-USA*. Madison, Wisconsin.
- Kanters, J., & Horvat, M. (2012). Solar Energy as a Design Parameter in Urban Planning. *Energy Procedia*, 30, 1143-1152. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.127>
- Littlefair, P. (1998). Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(3), 303-326. [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321\(97\)00009-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321(97)00009-9).
- Marins, K. C. C., & Romero, M. A. (2012). Integração de condicionantes de morfologia urbana no desenvolvimento de metodologia para planejamento energético urbano. *Ambiente Construído*, 117-137. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212012000400009>.
- Melo, A. P. (2012). *Desenvolvimento de um método para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais* (Doutorado em Engenharia Civil). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis.
- Ministério do Meio Ambiente – MMA. (2014). Energia Solar. Recuperado em 03 de março de 2014, de www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-solar
- Ministério das Minas e Energia – MME. (2012). Balanço Energético Nacional. 2011-12. Recuperado em dezembro de 2011, de <http://www.mme.gov.br/mme>
- Montenegro, A. (2013). *Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil* (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2013.
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1-3), 103-113. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6).
- Portal Energia. (2014). *Energias Renováveis*. Preço dos painéis solares fotovoltaicos cairá 60% até 2020. Recuperado em 04 de abril de 2014, de www.portalenergia.com/preco-dos-paineis-solares-fotovoltaicos-caira-60-ate-2020.
- Prefeitura de Florianópolis (1998). Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis – IPUF. Plano Diretor de Florianópolis. Florianópolis.
- Prefeitura de Fortaleza. (2009). Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Fortaleza. Fortaleza.
- Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), 49-59. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00079-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00079-8).
- Rütter, R. (2004). *Edifícios solares fotovoltaicos*. Florianópolis: Labsolar.
- Rendón, L. G. (2013). Potencial de Aplicação de Painéis Fotovoltaicos em Fachadas de Edificações em Diferentes Contextos Urbanos (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis.
- Santana, M. V. (2006). *Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis* (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis.
- Scheuring, J. (2006). *Wirtschaftsinformatik: Konzeption und Planung eines Informations- und Kommunikationssystems: Grundlagen mit zahlreichen Illustrationen, Beispielen, Repetitionsfragen und Antworten*. Compendio Bildungsmedien AG, ISBN 3715592729.

Stromann-Andersen, J., & Sattrup, P. A. (2011). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8), 2011-2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.007>.

Terece, A., Kestem, D., & Eicker, U. (2010). The impact of the urban form on heating, cooling and lighting demand of cities. ICSU Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Urbanisation. Hong Kong, 15-17.

The *United States Department of Energy* - DOE. (2012). EnergyPlus Energy Simulation Software - Weather Data. Recuperado em 04 de abril de 2014, de http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm

Vanesch, M. M. E., Looman, R. H. J., & De Bruin-Hoedijk, G. J. (2012). The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies. *Energy and Buildings*, 47(1), 189-200. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.042>.

Recebido: Nov. 14, 2016

Aprovado: Fev. 01, 2017