



XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Avanços no desempenho das construções – pesquisa, inovação e capacitação profissional

12, 13 E 14 DE NOVEMBRO DE 2014 | MACEIÓ | AL

AVALIAÇÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR E DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO NA ENVOLTÓRIA DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

SILVESTRE, Silvana M.S. (1); PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay (2)

(1) UFSC/LABCON, e-mail: silvana.ms.silvestre@gmail.com; (2) UFSC/LABCON, e-mail: feco@arq.ufsc.br

RESUMO

Em um país com grande potencial de irradiação solar, como o Brasil, o sistema fotovoltaico ligado à rede torna-se uma alternativa promissora para a geração de energia elétrica próxima ao ponto de consumo. Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou a Resolução Normativa nº 482, que estabelece as regras para instalação de geração distribuída de pequeno porte. A aplicação dos sistemas fotovoltaicos nos centros urbanos pode ser prejudicada pela verticalização das cidades e consequente obstrução solar. Por esta razão, esta pesquisa possui como objetivo principal avaliar a aplicação do sistema fotovoltaico na envoltória de diferentes edifícios residenciais para geração de energia elétrica. O método foi dividido em três etapas: identificação das tipologias residenciais para os estudos de caso; análise da disponibilidade solar incidente nas envoltórias das edificações e quantificação do potencial de geração de energia. As três edificações residenciais escolhidas localizam-se no centro urbano da cidade Blumenau, SC. Os modelos foram desenvolvidos no software *Rhinoceros* e simulados através do *plug-in DIVA* que permitiu, através de mapas de irradiação, a quantificação de irradiação solar nas partes opacas destes edifícios. Os resultados identificaram a cobertura (plano horizontal) como o plano de melhor aproveitamento da irradiação solar porém com áreas insuficientes para atender a demanda das unidades habitacionais e as fachadas (plano vertical) com áreas necessárias para atender a demanda das edificações, porém com produtividade do sistema fotovoltaico inferior a 50% quando comparado com a cobertura. Observou-se também que as obstruções no centro urbano reduzem o acesso solar, principalmente, nos andares inferiores das edificações.

Palavras-chave: Edificações residenciais, Irradiação solar, Sistema fotovoltaico

ABSTRACT

In a country with great potential of solar irradiation the grid-connected photovoltaic system becomes a promising alternative for electric energy generation close to the local of consumption. In 2012, the Brazilian National Electric Energy Agency (ANEEL) approved rules and standards for the installation of electricity generation systems integrated to the electricity distribution grid. The application of photovoltaic system on the envelope of the buildings in urban centers may be affected by the built density, higher buildings and consequent larger solar obstruction. For this reason the main goal of this research is to evaluate the application of photovoltaic system on the envelope of different residential buildings for electric power generation. The method was divided into three stages and had the following sequence: i) identification of residential typologies for the case studies; ii) analysis of incident solar availability in the envelopes of buildings, and iii) quantification of the potential for generating electric power. Three distinct residential buildings chosen for this study are located in the city of Blumenau, SC, Brazil. The building models were developed in Rhinoceros software and simulated using the plug-in Diva-4-Rhino that allowed through radiation maps, the quantification of annual solar irradiation in the opaque parts of these buildings. The results identified the roof (horizontal plane) as the plan better use of solar irradiation but with insufficient area to meet the demand of housing units and the facades (vertical plane) with enough area to meet the demand of the buildings but with the yield less than 50% when compared to the roof. It was also observed that the obstructions in the urban center reduce solar access, mainly on lower floors of buildings.

Keywords: Residential building, Grid-connected, Photovoltaic solar energy

1 INTRODUÇÃO

As cidades consistem no agrupamento de várias edificações com diferentes usos, que por sua vez, apresentam gabaritos, formas e dimensões variados, conforme os planos diretores de ocupação urbana do município. Em grande parte, estes planos são produzidos sem nenhuma consideração da acessibilidade ao sol (SCALCO, 2010). A teoria do envelope solar, proposta por Knowles e Berry (1980), aponta claramente o tamanho, forma, orientação, topografia, latitude e contexto urbano como os principais parâmetros que determinam os limites espaciais das edificações, para garantia de uma acessibilidade solar satisfatória.

A acessibilidade solar caracteriza-se na condição de exposição aos raios solares e tem grande impacto na adequação climática e geração de ambientes mais saudáveis, principalmente no setor residencial, objeto do estudo deste artigo. Esta condição pode interferir na necessidade de maior ou menor uso da energia elétrica pelos usuários deste setor, seja para condicionamento de ar ou iluminação artificial. De acordo com a EPE (2012), o setor residencial foi o segundo maior responsável pelo consumo de energia elétrica no Brasil, perdendo apenas para o setor industrial.

A energia solar possui diversas aplicações, sendo a geração direta de eletricidade através da tecnologia fotovoltaica, uma das alternativas para gerar energia *in loco*, junto à própria edificação, com menores impactos quando comparados com os da geração de energia proveniente de centrais hidrelétricas (QUAGLIA, 2010; ZOMER *et al*, 2011).

O Brasil tem radiação solar suficiente para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica (RÜTHER e ZILLES, 2011). A irradiação anual na superfície de um edifício depende da localização geográfica, dados meteorológicos, orientações e, no contexto urbano, da interferência do sombreamento das edificações do entorno, por isto é fundamental, para avaliação econômica deste sistema, conhecer os fatores que a influenciam (MARDALJEVIC e RYLATT, 2003).

A Agência Nacional de Energia Elétrica, aprovou em abril de 2012 a Resolução Normativa nº 482, que estabelece as regras para instalação de geração distribuída de pequeno porte, incluindo a micro geração (até 100 kW) e a mini geração (100 kW até 1 MW). Esta normativa institui o Sistema de Compensação de Energia que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora, trocar energia com a distribuidora e ter o excedente desta geração transformado em crédito para os meses subsequentes (ANEEL, 2012).

A inserção da tecnologia fotovoltaica no meio urbano tem vantagem quantitativa, pois existem grandes áreas disponíveis no envelope da edificação para a instalação deste sistema (SALAMONI, 2009; SANTOS e RÜTHER, 2012). De acordo com Gaviria (2013) a aplicação de painéis fotovoltaicos em planos verticais, considerando os arquivos climáticos de Florianópolis, possui potenciais maiores de irradiação nas orientações Leste e Oeste do que encontrados para a orientação Norte. Em uma pesquisa mais recente, Salamoni e Ruther (2014), encontraram resultados também para o plano vertical, em latitudes menores, que aumentam os ganhos entre 5% e 10% para energia anual, das fachadas orientadas para Leste e Oeste em relação às orientadas para o Norte.

O momento é oportuno para avaliar o acesso solar na envoltória das edificações residenciais e o potencial de geração de energia elétrica, através de sistemas fotovoltaicos, principalmente, em um país como Brasil, com a tarifa residencial de energia elétrica elevada, acima de alguns países como EUA, México e Coréia (EPE, 2013) e com um grande potencial de irradiação solar (SALAMONI, RÜTHER e ZILLES, 2009).

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste artigo é avaliar a irradiação solar e o potencial de geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos aplicados na envoltória de três edifícios multifamiliares verticais inseridos na malha urbana.

3 MÉTODO

O potencial para geração de energia elétrica do sistema fotovoltaico, aplicado na envoltória das edificações residenciais, foi analisado através desta pesquisa de caráter exploratório. O processo para realização do método foi dividido em três etapas e obedeceu a seguinte sequência: identificação das tipologias residenciais para os estudos de caso, análise da disponibilidade solar incidente nas envoltórias das edificações e quantificação do potencial de geração de energia.

Os edifícios residenciais selecionados para esta pesquisa possuem três, oito e treze pavimentos tipo de apartamentos e foram nomeadas nesta pesquisa de EM_RI, EM_VC e EM_VS. A diferença de gabarito permitiu a análise da interferência da verticalização na geração de energia elétrica, através do sistema fotovoltaico, quantificando o percentual do atendimento a demanda de energia destas edificações. As fachadas destas edificações possuem orientações diferentes conforme cenário urbano da cidade de Blumenau, localizada no estado de Santa Catarina, região sul do Brasil, com latitude de 26,9°S e longitude de 49,1°W.

3.1 Descrição dos empreendimentos

O menor empreendimento é o EM_RI, localizada no bairro da Velha, possui a fachada frontal com um desvio azimutal de 245,6 graus, posicionada entre os quadrantes SO e O. No mesmo bairro, a edificação EM_VC, possui a fachada frontal com um desvio azimutal de 66,66 graus, posicionada entre os quadrantes NE e L. O edifício com mais pavimentos é o EM_VS, localizado no bairro Victor Konder. A fachada frontal desta edificação possui um desvio azimutal de 216,6 graus, posicionada entre os quadrantes S e SO. O Quadro 1 apresenta de forma resumida os dados das três edificações e as áreas correspondentes a cobertura, fachadas e aberturas.

Quadro 1 – Dados dos três empreendimentos analisados nos estudos de caso.

| Nomeclatura | EM_RI | | EM_VC | | EM_VS | |
|--|-------|------------------------|-------|------------------------|--------|------------------------|
| | (%) | Area (m ²) | (%) | Area (m ²) | (%) | Area (m ²) |
| Área total pavimento tipo | | 216,90 | | 415,00 | | 405,00 |
| Área de fachada | | 172,05 | | 284,90 | | 608,16 |
| Área opaca | 83,11 | 142,99 | 82,30 | 234,47 | 83,25 | 506,28 |
| Área de abertura | 16,89 | 29,06 | 17,70 | 50,43 | 16,75 | 101,88 |
| Área de cobertura | | 151,75 | | 340,96 | | 524,81 |
| Relação área de cobertura/pavimento tipo | 5,38 | | 6,32 | | 9,97 | |
| Relação área de fachada/pavimento tipo | 65,92 | | 56,50 | | 125,01 | |

Fonte: Autores

3.2 Modelagem e simulação das edificações

As edificações estudadas e a área de abrangência foram modelados de forma tridimensional no programa Rhinoceros v5.0 (MCNEEL, 2012). Os edifícios foram modelados seguindo as formas e dimensões reais. As fachadas foram simplificadas e as áreas de sacadas, delimitadas na parte externa da edificação, foram representadas com o fechamento em vidro. Apenas as áreas opacas foram computadas como áreas com

potencial para inserção de painéis fotovoltaicos. As áreas de janelas e sacadas foram consideradas como áreas de aberturas e não receberam os pontos para análise de irradiação. De forma a padronizar a avaliação das edificações multifamiliares foram considerados como áreas verticais, para avaliação da irradiação solar, apenas a parte da envoltória que corresponde aos pavimentos-tipo da edificação. As coberturas dos prédios foram consideradas como laje impermeabilizada, desconsiderando qualquer especificação dos telhados que possam ter sido construídos. Quanto à caixa d'água excluiu-se da análise a envoltória vertical, apenas a cobertura da mesma foi computada.

Os empreendimentos do entorno foram inseridos também em blocos tridimensionais, obedecendo às formas e as dimensões, foram desenhados como sólidos, sem inclusões de aberturas, brises e/ou outros detalhes arquitetônicos. Estes edifícios fizeram parte da análise apenas como obstrução aos estudos de caso analisados.

Para alcançar o objetivo proposto deste trabalho, a análise dos estudos de caso fundamentou-se no método de simulação computacional, assim sendo, utilizou-se o *plug-in* denominado DIVA-for-Rhino, desenvolvido inicialmente na Escola de Pós-Graduação em Design da Universidade de Harvard (LAGIOS, 2013) que permitiu avaliações, através de uma série de pontos aplicados sobre as áreas opacas das edificações, de mapas de irradiação com o edifício inserido contexto urbano.

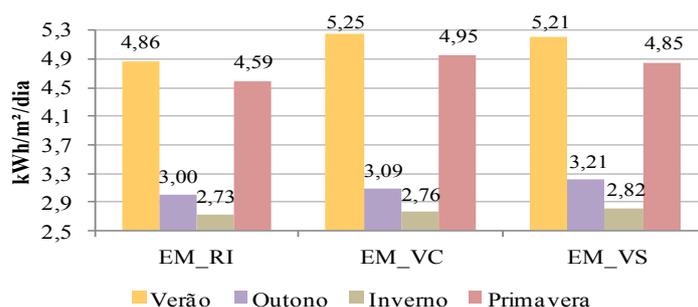
As simulações foram feitas a partir dos arquivos climáticos com a extensão EPW (*Energy Plus Weather*) com a base de dados SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) (DOE, 2013). Foi adotado o arquivo da cidade de Florianópolis, localizada a 27,6°S e 48,5°W, pois o SWERA não possui arquivo climático para a cidade de Blumenau (PEREIRA *et al*, 2006).

4 RESULTADOS

As simulações foram realizadas para o período de um ano (365 dias) e foram analisados os valores da média anual e das estações do ano: verão, outono, inverno e primavera. Com intuito de identificar as potenciais obstruções, os valores foram identificados separadamente para as quatro fachadas para a cobertura das edificações. Como forma de quantificar os valores, de acordo com o gabarito das edificações foi identificada também a irradiação diária recebida nas malhas de pontos por pavimentos.

As coberturas receberam malhas de pontos no plano horizontal. Os níveis de irradiação da média diária na horizontal foram iguais para os dois edifícios mais altos EM_VS e EM_VC de 3,99 kWh/m² e para o EM_RI é de 3,78kWh. O comportamento dos resultados, quando analisado por estação do ano, é similar, alcançando valores maiores no verão, seguido pela primavera e, com uma redução entre 38% e 45%, quando comparado com verão, nas estações de outono e inverno, sendo esta última com os menores valores de irradiação. A Figura 1 apresenta os valores das três edificações.

Figura 1 - Gráfico das médias diárias (kWh/m²/dia) por estações do ano das simulações realizadas com os pontos de análises no plano horizontal (cobertura).

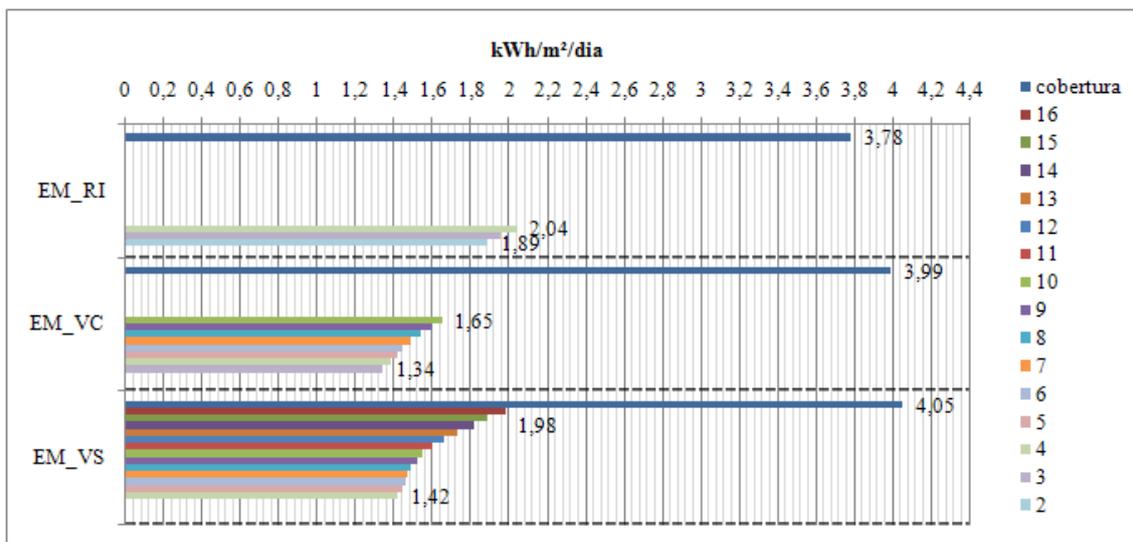


Fonte: Autores

No verão as maiores médias diárias das coberturas EM_VS e EM_VC, 5,21 kWh/m²/dia e 5,25 kWh/m²/dia, respectivamente ultrapassaram a máxima média diária de irradiação encontrada por Santos (2013), que apresentou para Florianópolis o valor de 4,8kWh/m²/dia para 100% de radiação.

Os pavimentos mais altos receberam índices maiores de irradiação solar e decresceram de acordo com a redução dos andares (Figura 2). Nas três edificações, a análise das áreas opacas que receberam as malhas de pontos na vertical, no último pavimento tipo, obteve a maior média diária: 2,04 kWh/m², 1,65 kWh/m² e 1,98 kWh/m², valores respectivos dos prédios analisados com três, oito e treze andares. O valor percentual entre as variações de cada pavimento foi de 0,68% a 4,5%.

Figura 2 - Gráfico das médias diárias (kWh/m²/dia) de um ano de simulação realizadas com os pontos de análises no plano vertical por pavimento.



Fonte: Autores

A Tabela 1 apresenta os dados relevantes encontrados para as fachadas. Na primeira coluna de cada edificação tem-se a quantidade de pontos analisados e as áreas opacas onde foram inseridas estas malhas. A partir da segunda coluna tem-se a quantidade de irradiação recebida pelo período analisado (ano e estações), os resultados apresentados são da média de todos os pontos, por período e a média diária.

Nas simulações da edificação EM_VS, a melhor média anual foi de 2,04kWh/m²/dia e corresponde a orientação N-NE, fachada posterior da edificação que não possui obstrução direta. O pior valor obtido, aproximadamente 50% inferior a melhor fachada, corresponde à orientação S-SO, com o valor de 1,12 kWh/m²/dia. Segundo os valores obtidos para este estudo de caso, a maior interferência do entorno encontra-se ao lado esquerdo, na fachada O-NO.

As quatro estações do ano apresentam comportamentos similares nas fachadas direcionadas mais para o norte, entre os quadrantes N-NE e O-NO. A média diária de irradiação solar tem pouca variação entre as estações, mas o outono destaca-se como a melhor média diária nestas duas orientações. As demais fachadas direcionadas mais para o sul, entre os quadrantes L-SE e S-SO, apresentam os melhores resultados no verão, seguido da primavera. Nas demais estações, outono e inverno, obtiveram-se valores com o percentual reduzido entre 50% e 60% , quando comparado com o verão.

A simulação do edifício EM_VC apresentou os melhores índices de irradiação para a fachada com orientação NE-L, incluindo a média anual e os melhores níveis em todas as estações do ano. Esta fachada é a frontal e possui recuos obrigatórios dentro do terreno.

O afastamento das outras edificações é somado a este recuo e também ao sistema viário, resultando em uma distância entre torres de aproximadamente 30 metros. A orientação SO-O, representada pela fachada posterior, apresentou um comportamento semelhante à fachada frontal para as estações do ano verão e primavera. Porém, no outono e inverno, quando comparado com os valores da fachada frontal, houve uma redução de 40% e 35% respectivamente.

Tabela 1 – Resumo dos dados em kWh/m² por período analisado resultantes da simulação de todas as fachadas dos três estudos de caso

| | EM_RI | | | EM_VC | | | EM_VS | | |
|------------------|---------------------|-----------------------------|------|---------------------|-----------------------------|------|---------------------|-----------------------------|------|
| | Orient. Média | | | Orient. Média | | | Orient. Média | | |
| | A (m ²) | Período | Dia | A (m ²) | Período | Dia | A (m ²) | Período | Dia |
| | Pontos | kWh/m ² /período | | Pontos | kWh/m ² /período | | Pontos | kWh/m ² /período | |
| FRONTAL | SO-O | | | NE-L | | | S-SO | | |
| Ano | 83,1 | 616,63 | 1,69 | 493,3 | 697,97 | 1,91 | 1322,4 | 409,57 | 1,12 |
| Verão | 384 | 198,78 | 2,23 | 2800 | 191,82 | 2,16 | 3302 | 142,01 | 1,6 |
| Outono | | 111,33 | 1,21 | | 173,25 | 1,88 | | 64,34 | 0,7 |
| Inverno | | 103,17 | 1,12 | | 146,04 | 1,59 | | 60,14 | 0,65 |
| Primavera | | 201,52 | 2,19 | | 186,73 | 2,03 | | 142,66 | 1,55 |
| Lat. ESQ. | NO-N | | | SE-S | | | O-NO | | |
| Ano | 143,8 | 964,95 | 2,64 | 449,9 | 352,55 | 0,97 | 2049,8 | 588,40 | 1,61 |
| Verão | 660 | 204,39 | 2,3 | 2304 | 119,45 | 1,34 | 5226 | 147,31 | 1,66 |
| Outono | | 288,32 | 3,13 | | 59,61 | 0,65 | | 154,24 | 1,68 |
| Inverno | | 269,99 | 2,93 | | 55,55 | 0,6 | | 144,37 | 1,57 |
| Primavera | | 202,34 | 2,2 | | 117,93 | 1,28 | | 142,49 | 1,55 |
| POSTERIOR | NE-L | | | SO-O | | | N-NE | | |
| Ano | 83,6 | 777,00 | 2,13 | 497,0 | 552,99 | 1,52 | 1191,8 | 745,76 | 2,04 |
| Verão | 384 | 229,90 | 2,58 | 2968 | 181,57 | 2,04 | 3601 | 175,32 | 1,97 |
| Outono | | 176,56 | 1,92 | | 102,25 | 1,11 | | 211,02 | 2,29 |
| Inverno | | 149,15 | 1,62 | | 95,25 | 1,04 | | 190,79 | 2,07 |
| Primavera | | 217,26 | 2,36 | | 173,93 | 1,89 | | 166,43 | 1,81 |
| Lat. DIR | SE-S | | | NO-N | | | L-SE | | |
| Ano | 118,5 | 454,62 | 1,25 | 434,5 | 520,13 | 1,43 | 2017,6 | 644,70 | 1,77 |
| Verão | 570 | 161,99 | 1,82 | 2296 | 130,59 | 1,47 | 5167 | 228,23 | 2,56 |
| Outono | | 71,76 | 0,78 | | 138,84 | 1,51 | | 108,61 | 1,18 |
| Inverno | | 67,88 | 0,74 | | 125,82 | 1,37 | | 92,90 | 1,01 |
| Primavera | | 153,14 | 1,66 | | 124,89 | 1,36 | | 214,73 | 2,33 |

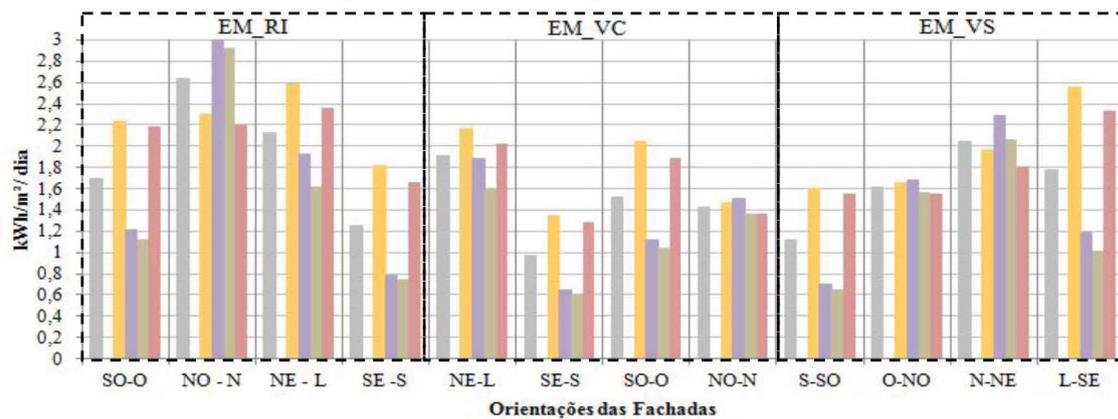
Fonte: Autores

O mesmo comportamento citado anteriormente ocorreu com a fachada SE-S, no qual a redução dos níveis de irradiação do outono e inverno, em relação ao verão, foram maiores de 50%, sendo estes, praticamente, os menores valores de todas as simulações. O comportamento desta fachada é explicado por estar mais voltado para o Sul e ainda possuir obstrução, ocasionada por um edifício mais alto do que o prédio estudado.

Segundo os valores obtidos em todas as simulações, a fachada que apresenta a maior média diária foi a NO-N do estudo de caso EM_RI. Atualmente, esta fachada não possui construções na adjacência, o que resultou em 2,64 kWh/m²/dia. Esta mesma edificação, quando calculado a média diária de um período de um ano para todas as fachadas, obteve o melhor nível de irradiação (1,93 kWh/m²/dia) dos três estudos de caso. A Figura 3 apresenta em forma de gráfico os resultados referentes à análise no plano vertical e o Quadro 2 apresenta algumas ilustrações dos *outputs* para verão e inverno resultante da simulação com *plug in* Diva for Rhino.

O consumo estimado de cada unidade habitacional (UH) foi baseado em Montenegro (2013), que analisou o consumo médio mensal dos consumidores residenciais (exceto baixa renda), no ano de 2011, para as 27 capitais brasileiras e concluiu que torna-se razoável o consumo de 250 kWh/mês. Este valor foi adotado neste trabalho para as UHs com 3 dormitórios, reduziu-se para 220,0 kWh/mês com dois dormitórios e 190 kWh/mês para um dormitório. Após calculado, obteve-se o seguinte consumo: EM_RI com 1500 kWh/mês, EM_VC com 7600 kWh/mês e EM_VS com 16300 kWh/mês.

Figura 3 - Gráfico das médias diárias (kWh/m²/dia) por estações do ano das simulações realizadas com os pontos de análises no plano vertical (fachadas)



Fonte: Autores

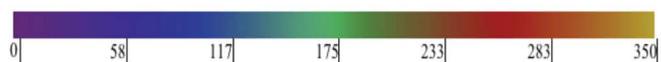
■ Ano ■ Verão ■ Outono ■ Inverno ■ Primavera

Quadro 2 – Imagens de alguns resultados das simulações no contexto urbano

| | Orientação | Fachada Frontal e Lateral Esquerda | |
|-------|------------|------------------------------------|---------|
| | | Verão | Inverno |
| EM_RI | | | |
| EM_VC | | | |
| EM_VS | | | |

Legenda: Escala de cores em kWh/m²

Fonte: Autores



Para o cálculo da geração, foi considerada como área útil do plano horizontal ou vertical (já excluídos as aberturas) apenas 85% dos valores indicados anteriormente. Segundo Zomer (2009) esta seria a perda para a diagramação dos módulos. Não foram consideradas neste trabalho a integração estética ou técnica do sistema fotovoltaico nestas edificações. A eficiência do módulo solar fotovoltaico considerado para a estimativa de geração foi de 14%, considerando a aplicação da tecnologia de silício multicristalino (ZOMER 2009). Com os dados do consumo energético das edificações (kWh/mês) e os valores de irradiação solar (kWh/m²/dia) encontrados nas simulações apresentadas anteriormente, foram feitos os cálculos da potência (P_{FV}) a ser instalada em kWp e também a previsão anual de produtividade do sistema (*yield*) que é dada pela razão entre a geração fotovoltaica estimada e a potência instalada (Tabela 2).

Os valores de produtividade encontrados para as coberturas são compatíveis com os valores da produtividade anual de 1.114 kWh/kWp encontrados na medição do sistema

da Casa Eficiente em 2008 (LAMBERTS *et al*, 2010). Para as fachadas a redução foi de mais de 50% em relação ao desempenho da cobertura, nos três estudos de caso.

A área disponível na cobertura apenas do EM_RI é suficiente para atender 100% da demanda da geração de energia. As fachadas, nos três estudos de caso, possuem áreas suficientes para a instalação do sistema mas com um desempenho menor que 50% quando comparado com a cobertura.

Tabela 2 – Resultados calculados da potência fotovoltaica (P_{FV}), do *yield*, do investimento e da economia do sistema fotovoltaico

| Edificações | Local de aplicação | Geração kWh/mês | Irradiação kWh/m ² /dia | P_{FV} (kWp) | Área (m ²) | Área útil exist. (m ²) | Yield kWh/kWp | Invest. (R\$) | Economia Ano (R\$) |
|--------------|--------------------|-----------------|------------------------------------|----------------|------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|
| EM_RI | Cobertura | 1500 | 3,78 | 16,5 | 118,1 | 129,0 | 1088,6 | 115740,7 | 7200,0 |
| cenário 1 | Fachada | | 1,93 | 32,4 | 231,3 | 364,6 | 555,8 | 226683,9 | 7200,0 |
| EM_VC | Cobertura | 7600 | 3,78 | 79,4 | 566,9 | 289,8 | 1149,0 | 555590,0 | 36480,0 |
| cenário 1 | Fachada | | 1,48 | 214,0 | 1528,3 | 1594,4 | 426,2 | 1497747,7 | 36480,0 |
| cenário 2 | Cobertura | 3876 | 3,99 | 40,5 | 289,1 | 289,8 | 1149,1 | 283333,3 | 18604,8 |
| | Fachada | 3724 | 1,54 | 100,8 | 719,7 | 1594,4 | 461,6 | 705303,0 | 17875,2 |
| EM_VS | Cobertura | 16380 | 4,05 | 168,5 | 1203,7 | 446,1 | 1166,4 | 1179640,0 | 78624,0 |
| cenário 1 | Fachada | | 1,62 | 421,3 | 3009,3 | 5594,4 | 466,6 | 2949100,0 | 78624,0 |
| cenário 2 | Cobertura | 6060,6 | 4,05 | 62,4 | 445,4 | 446,1 | 1166,4 | 436463,0 | 29090,9 |
| | Fachada | 10319 | 1,94 | 221,6 | 1583,1 | 5594,4 | 558,7 | 1551456,2 | 49533,1 |

Fonte: Autores

De acordo com CELESC (2014) as tarifas da classe residencial do subgrupo B1, possui tarifas e impostos diferenciados para consumo até 150kWh/mês e acima deste valor. Para este artigo, que não possui a intenção de um análise financeira detalhada, considerou-se que o consumidor pague a concessionária o valor de R\$ 0,40 por kWh/mês, incluído os impostos. Adotou-se o valor de R\$ 7000,00 o custo do kWp instalado, valor considerado como cenário real por Montenegro (2013), no qual o autor identifica que o sistema fotovoltaico torna-se viável em Florianópolis no caso do aumento anual das tarifas residenciais B1 aumentarem acima de 5% aa. O ajuste anual da tarifa em todos os cenários analisados foi adotado também 5% aa.

No cenário 1, analisou-se em quantos anos a economia do valor não pago a concessionária torna-se equivalente ao investimento inicial de todo o sistema, excluindo a análise da aplicação financeira ao longo dos anos. Neste caso o EM_RI, que possui área suficiente na cobertura e fachada precisaria de 14 anos e 28 anos, respectivamente, para a economia do valor da energia que não será paga a concessionária cobrir os custos do sistema fotovoltaico investido, apresentado a cobertura como a posição mais adequada e viável para a geração de energia. Nas outras duas edificações, mais verticalizadas, as coberturas não seriam suficientes para atender 100% da demanda e para as fachadas, o sistema seria equivalente ao valor do investimento, após 40 anos.

O cenário 2 analisa o investimento do sistema com a combinação entre geração fotovoltaica no plano horizontal e vertical, desconsiderando também análise da aplicação financeira ao longo dos ano, da mesma forma do cenário 01. A configuração do sistema fotovoltaico para o estudo de caso EM_VC, considera com 51% do sistema instalado na cobertura e os outros 49% da demanda com o sistema fotovoltaico na fachada, correspondendo aos 4 pavimentos mais altos. O resultado apresenta tempo estimado de 27 anos para o valor economizado do pagamento a concessionaria alcance o valor do investimento inicial.

A configuração do sistema fotovoltaico para o estudo de caso EM_VC, considera com 51% do sistema instalado na cobertura e os outros 49% da demanda com o sistema fotovoltaico na fachada, correspondendo aos 4 pavimentos mais altos. O resultado apresenta um tempo de aproximadamente 27 anos para o valor economizado do pagamento a concessionária alcance o valor do investimento inicial.

A edificação EM_VS no cenário 2 configura-se com 37% do sistema instalado na cobertura e os demais 63% seriam instalados na fachada, no qual ocupariam apenas os dois pavimentos mais alto. Desta forma, a irradiação diária média dos dois pavimentos deste edifício passaria a ser 1,94 kWh/m² ao invés de ser 1,62kWh/m² da média de todos os andares. O tempo estimado para que os valores se iguallassem nas mesmas condições citadas anteriormente seria aproximadamente de 26 anos.

5 CONCLUSÕES

A inserção urbana da tecnologia fotovoltaica para geração de energia elétrica próximo ao ponto de consumo recebeu incentivos com a resolução nº 482 da ANEEL, mas o valor do investimento do sistema precisa reduzir para atender ao perfil do consumidor residencial.

A cobertura, avaliada neste trabalho como plano horizontal da edificação, apresentou-se como o plano de melhor aproveitamento de irradiação solar. Mas, de acordo com a altura das edificações, este plano pode não dispor de área suficiente para atender a demanda das unidades habitacionais. Na avaliação das fachadas, o estudo demonstrou que as edificações possuem áreas suficientes para aplicação dos painéis fotovoltaicos, porém a produtividade do sistema é reduzida para valores abaixo de 50% quando comparados com a produção de energia de um sistema aplicado na cobertura.

As obstruções no centro urbano reduzem o acesso solar as edificações, principalmente, nos andares inferiores. A fachada frontal, comumente distanciada de outras edificações por vias, calçadas e recuos frontais maiores, não sofre interferência significativa das obstruções, porém possuem áreas reduzidas quando comparadas com as fachadas laterais, por características das disposições longitudinais dos lotes urbanos, para aplicação de painéis fotovoltaicos. O trabalho apresentou resultados que indicam que as fachadas quando direcionadas ao Norte com desvio azimutal para Leste ou para Oeste são as mais indicadas para receber o sistema fotovoltaico.

É relevante ressaltar que não foram analisadas as questões estéticas relacionadas à aplicação de painéis fotovoltaicos em toda a edificação e não foram simuladas novas obstruções que podem ser construídas no contexto urbano e interferir nos valores de geração de energia de um sistema instalado, principalmente, nos planos verticais.

Os cenários apresentados não são rentáveis quando o objetivo é suprir todo o consumo de uma edificação residencial vertical, pois o valor do investimento do sistema fotovoltaico ainda é alto quando comparado com os valores a serem pagos para a concessionária de energia. Os resultados deste artigo contribuem para que novos cenários urbanos possam ser criados e aplicação de painéis fotovoltaicos possa ocorrer de forma a reduzir a dependência de energia da rede elétrica.

Finalmente, existe a expectativa do mercado que políticas de incentivos tornem o acesso à tecnologia fotovoltaica mais viável. Em especial, para sua aplicação nos centros urbanos será imprescindível que sejam analisados as obstruções solares, os níveis de irradiação no plano a ser instalado e a geração de energia, simultaneamente a viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa no 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2013.
- CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina. **Tarifas**. Disponível em: <<http://novoportalecelesc.com.br/portal/index.php/duvidas-mais-frequentes/42-fatura/1140-tarifa>>. Acesso em: 10 maio 2014.
- DOE - Department of Energy. **Weather Data**. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=3_south_america_wmo_region_3/country=BRA/cname=Brazil>. Acesso em: 18 set. 2013.
- EPE-Empresa de Pesquisa Energética. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2013-2022)**. Rio de Janeiro, 2012.
- EPE-Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de energia elétrica 2013**. Rio de Janeiro, 2013.
- GAVIRIA, L. R. **Influência da configuração urbana na geração energética de sistemas fotovoltaicos integrados as fachadas**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- KNOWLES, R. L.; BERRY, R. D. **Solar Envelope Concepts: Moderate Density Building Applications : Final Report**. Los Angeles, 1980.
- LAGIOS, K. **Diva for Rhino: Environmental Analysis for Buildings**. Cambridge, MA, USA, 2013. Disponível em: <<http://diva4rhino.com/>>. Acesso em: 18 set. 2013.
- LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. **Casa Eficiente: Consumo e Geração de Energia**. Florianópolis, 2010.
- MARDALJEVIC, J.; RYLATT, M. Irradiation mapping of complex urban environments: an image-based approach. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 1, p. 27–35, jan. 2003.
- MCNEEL, R. **Rhinoceros**, 2012. Disponível em: <<http://www.rhino3d.com/>>. Acesso em: 18 set. 2013.
- MONTENEGRO, A. **Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE ed. São José dos Campos: 2006.
- QUAGLIA, R.B. **Incentivo à Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos: cenários para o setor elétrico brasileiro**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do ABC, São Paulo, 2010.
- RÜTHER, R.; ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, v.39, n.3, p.1027–1030, mar. 2011.
- SALAMONI, I. T. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R.; ZILLES, R. Uma oportunidade para o desenvolvimento da indústria fotovoltaica no Brasil : eletricidade solar para os telhados. **Parcerias Estratégicas**, v.14, p.219–243, 2009.
- SANTOS, I. P. **Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura**. Tese(doutorado).Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- SANTOS, I. P.; RÜTHER, R. The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 290–297, jul. 2012.
- SCALCO, V. A. **Método para a avaliação dos impactos de edificações sobre a iluminação natural e insolação em vizinhanças urbanas**. Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- ZOMER, C. D. **O sol: caminho para a sustentabilidade energética de uma casa container**. Eco_Lógicas: Concurso Catarinense de Monografias sobre Energias Renováveis e Eficiência Energética. Florianópolis, 2009.
- ZOMER, C. D.; Urbanetz, J.; MONTENEGRO, A.; PFITSCHER, P.H.; RÜTHER, R. Compromissos entre forma e função de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações e conectados à rede em baixas latitudes. **XI ENCAC: Encontro nacional de Conforto no Ambiente Construído**. Búzios, 2011.