

## DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO FOTOVOLTAICOS: RELAÇÕES ENTRE MULTIFUNCIONALIDADE E VIABILIDADE NO BRASIL

Isadora Pauli Custódio – isadora.custodio@posgrad.ufsc.br

Tiago de Castro Quevedo – quevedotc@gmail.com

Ana Paula Melo – a.p.melo@ufsc.br

Ricardo Rütther – ricardo.ruther@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

**Resumo.** Para o desenvolvimento de um projeto de integração solar fotovoltaica (FV) a edificações, destaca-se a importância do estudo da geração de energia em conjunto com a qualidade arquitetônica, observando características funcionais, construtivas e formais da edificação. Muitos projetos utilizam a integração arquitetônica de módulos fotovoltaicos em coberturas, mas pouca atenção tem sido dada à integração em fachadas e principalmente às influências dos sistemas FV nos ambientes internos das edificações. A utilização de módulos fotovoltaicos em fachadas é uma abordagem inovadora que possui alto potencial para geração de energia solar no país. Frente a isso, este trabalho avalia a integração de dispositivos de sombreamento compostos por módulos fotovoltaicos nas fachadas de um modelo de edificação comercial, em seis cidades brasileiras. O edifício foi modelado e simulado com variações na distância entre os dispositivos de sombreamento e as fachadas, com o objetivo de avaliar o consumo de energia para refrigeração e desempenho do sistema FV. A partir disso, analisou-se a relação deste consumo com a geração de energia, e o Custo Nivelado de Energia (LCOE). As análises evidenciaram que entender a relação do funcionamento dos dispositivos de sombreamento com a geração de energia é de extrema importância, já que simples mudanças podem reduzir o consumo e aumentar o percentual de atendimento desse consumo, além de trazer benefícios econômicos com a geração de energia fotovoltaica.

**Palavras-chave:** Sistemas Fotovoltaicos Integrados a Edificações, Componente Fotovoltaico Multifuncional, LCOE de Sistemas Fotovoltaicos

### 1. INTRODUÇÃO

De acordo com o BIG (Banco de Informações de Geração) da ANEEL, atualizado em dezembro de 2019, o Brasil possui 2,39 GWp de potência instalada em usinas fotovoltaicas (FV) (ANEEL, 2019a). No ano de 2018, a geração distribuída atingiu uma potência instalada de 669,60 MWp, sendo a fonte solar fotovoltaica responsável por quase 84% deste valor, com 562,30 MWp (EPE, 2019). Além do incentivo proporcionado pelas ações regulatórias da ANEEL, essa alta contribuição se deve à possibilidade de integração dos sistemas fotovoltaicos ao envelope das edificações, de maneira esteticamente agradável (ANEEL, 2015, 2012).

A integração de módulos fotovoltaicos a edificações pode acontecer por meio de, basicamente, duas abordagens. Na primeira, conhecida como BAPV (*Building-Applied Photovoltaics*), os módulos são instalados com orientações e inclinações que podem ser diferentes das dos planos já existentes nas edificações. Na outra abordagem, denominada BIPV (*Building-Integrated Photovoltaics*), os módulos seguem o desenho arquitetônico da edificação e podem atuar como substitutos de materiais mais convencionais da construção civil. De acordo com a IEA (*International Energy Agency*), um projeto de BIPV deve englobar, além da integração fotovoltaica, características funcionais, construtivas e formais do projeto arquitetônico. Portanto, quando instalados em coberturas ou fachadas, os módulos devem assumir qualidades construtivas e funcionais, ao mesmo tempo em que, preservam a qualidade estética da forma arquitetônica (Frontini et al., 2012).

No Brasil, o aproveitamento do sol para geração de energia elétrica é bastante atrativo, já que o país possui condições ideais de radiação solar durante o ano inteiro. A média anual de irradiação global horizontal é bastante homogênea em todo o território do país, com o valor máximo de 6,25 kWh/m<sup>2</sup>.dia em pontos específicos do sertão nordestino (Pereira et al., 2017). Diante disso, e do constante aperfeiçoamento da eficiência da tecnologia FV (ISE, 2019), observa-se um crescimento significativo de projetos que utilizam a integração arquitetônica de módulos fotovoltaicos em coberturas.

No entanto, nota-se pouca existência de projetos com a integração da tecnologia FV em fachadas. A utilização de módulos FV em fachadas é uma abordagem inovadora de geração de energia, com benefício econômico, que possui um alto potencial para geração de energia solar no país (Sorgato et al., 2018). Em Florianópolis-SC, por exemplo, cidade com um dos menores índices de média anual de irradiação global horizontal do país (4,25 kWh/m<sup>2</sup>.dia), as fachadas Norte recebem até 63% do máximo da radiação anual possível (Custódio, 2019).

Trabalhos que analisam BIPV em fachadas, normalmente, contemplam estudos sobre as viabilidades técnica e econômica dos sistemas FV (Lopez et al., 2014; Sánchez and Izard, 2015; Sorgato et al., 2018), mas poucos são os estudos que abordam as influências das fachadas solares nos espaços internos das edificações.

A integração de sistemas FV em fachadas pode estar relacionada tanto com reduções nos consumos da edificação quanto ao conforto ambiental. Zhang et al. (2018) evidenciaram como sistemas FV podem ser aplicados em fachadas, com função de sombreamento, para aproveitar a radiação direta para a geração de energia e, ao mesmo tempo, reduzir a carga necessária para resfriamento do ambiente interno. Ainda, estudos apontam que o uso de dispositivos de sombreamento (brises) em edificações é uma estratégia eficiente, podendo diminuir o consumo geral da edificação em até 55% (Uribe et al., 2018).

Diante disso, neste trabalho destaca-se a importância em avaliar a multifuncionalidade da integração de dispositivos de sombreamento compostos por módulos fotovoltaicos, em fachadas de um modelo de edificação comercial, em seis cidades brasileiras. O edifício foi modelado e simulado com variações na distância entre os dispositivos de sombreamento e as fachadas, com o objetivo de analisar as alterações na demanda energética para refrigeração e no desempenho (*Performance Ratio* – PR) do sistema FV. A partir disso, observou-se a relação da demanda com a geração energética, e o Custo Nivelado de Energia (*Levelized Cost of Electricity* – LCOE) foi calculado e comparado com as tarifas de energia vigentes em cada cidade, para avaliar a viabilidade econômica dos brises propostos.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Tipologia

Foi elaborado um modelo de edificação comercial de cinco pavimentos tipo, de dimensões 30 m x 25 m x 15 m, com área total de 750 m<sup>2</sup> por pavimento. A análise foi realizada para o Escritório 1, que possui dimensões de 12,5 m x 12,5 m e paredes externas com aberturas voltadas para o Norte e para o Oeste, conforme mostra a Fig. 1. Da mesma maneira, os dispositivos de sombreamento fotovoltaicos foram propostos apenas para a área de parede externa desse escritório (parte das fachadas Norte ou Oeste).

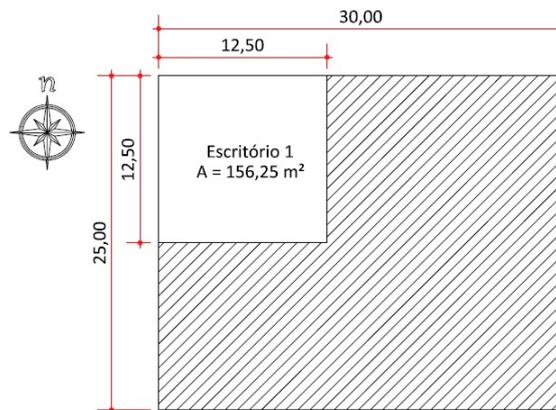


Figura 1 – Esquema de planta baixa com a localização do Escritório 1 no pavimento tipo.

A escolha das fachadas (Norte ou Oeste) para a integração dos brises fotovoltaicos foi realizada com base na disponibilidade de irradiação solar em fachadas nas seis cidades analisadas neste trabalho: Florianópolis-SC (27°S, 48°O), São Paulo-SP (23°S, 46°O), Brasília-DF (15°S, 47°O), Salvador-BA (12°S, 38°O), Recife-PE (8°S, 34°O) e Belém-PA (1°S, 48°O). O *software* RADIASOL (LABSOL/UFRGS, 2009) foi utilizado para avaliar a fachada com maior incidência de radiação solar anual para cada cidade e assim definir aquela que receberia os dispositivos de sombreamento fotovoltaicos, já que assim os brises teriam uma maior influência na redução da radiação incidente no Escritório 1 e receberiam maiores quantidades de radiação para a geração de energia. A Fig. 2 apresenta o modelo volumétrico da edificação com as opções de instalação dos brises na fachada Norte e na fachada Oeste do Escritório 1.

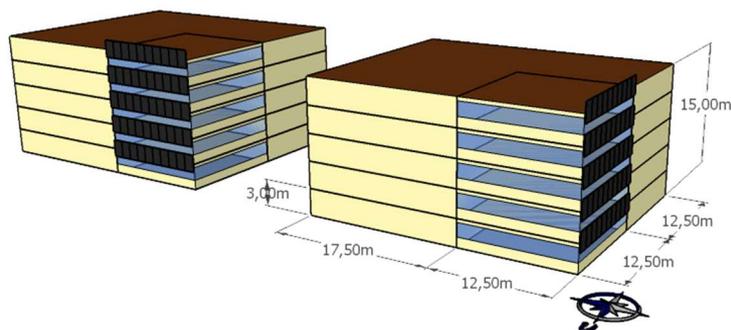
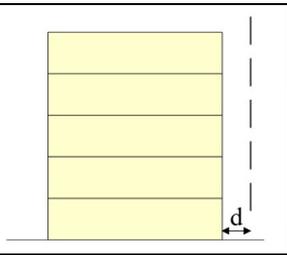


Figura 2 – Modelos volumétricos 3D da edificação, com brises nas fachadas Norte e Oeste do Escritório 1.

Por fim, foram elaborados cinco cenários com variações na distância (d) dos brises em relação às fachadas. A Tab. 1 mostra as características dos cenários estudados. O objetivo foi avaliar o consumo de energia para refrigeração do Escritório 1 e o desempenho (*Performance Ratio* – PR) do sistema FV para cada cenário, nas seis cidades.

Tabela 1 – Cenários propostos para as simulações.

Cenário	Distância (d) entre os brises e a fachada	
1	10 cm	
2	30 cm	
3	50 cm	
4	70 cm	
5	90 cm	

Para a simulação de eficiência energética foi utilizado o *software* EnergyPlus™ (versão 9.1) (DOE, 2019). Foram desenvolvidos dois casos do modelo do Escritório 1: o primeiro com os dispositivos de sombreamento na fachada Norte e outro com os dispositivos na fachada Oeste, ambos com aberturas nas fachadas Norte e Oeste. As paredes em contato com as outras zonas térmicas (demais escritórios) foram consideradas como adiabáticas.

Os brises foram simulados com os diferentes afastamentos em relação à fachada (10 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm e 90 cm), com o objetivo de avaliar a variação do consumo de energia de acordo com essas alterações. Durante todas as simulações foram mantidas as mesmas características construtivas do modelo, como materiais das paredes e da cobertura, percentual de abertura das fachadas, absorvâncias e carga térmica interna. A Tab. 2 apresenta os dados de entrada utilizados no *software*.

Tabela 2 – Dados de entrada utilizados nas simulações do EnergyPlus™.

DADOS DE ENTRADA	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E CARGAS TÉRMICAS INTERNAS
Paredes	Reboco 2,5 cm + Tijolo cerâmico 11 cm + Reboco 2,5 cm $U = 2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$
Absortância das paredes	0,3
Absortância das coberturas	0,3
Coberturas	Telha fibrocimento + câmara de ar não ventilada + laje de concreto $U = 2,06 \text{ W/m}^2\text{K}$
Densidade de ocupação	10 m <sup>2</sup> /pessoa ocupado das 9:00 às 18:59 somente dias de semana
Densidade de iluminação	14,1 W/m <sup>2</sup>
Contato com o Solo	Edificação em contato com o solo utilizando o <i>Ground Domain</i>
Ar condicionado	Template PTHP <i>EnergyPlus</i> COP <sub>pref</sub> = 3W/W e COP <sub>aq</sub> = 2,75W/W

O percentual de abertura de fachada utilizado foi de 48%, o que representa janelas de 1,50 m de altura e peitoris de 1,10 m, com fator solar dos vidros de 0,82 e transmitância térmica igual a 5,7 W/m<sup>2</sup>K. Foram elaborados cinco modelos para cada uma das seis cidades, a fim de contemplar todos os cenários propostos. Por fim, foram realizadas as simulações para avaliar o consumo energético anual de refrigeração do Escritório 1.

## 2.2 Módulos fotovoltaicos adotados

Módulos da tecnologia de telureto de cádmio (CdTe), de 440 Wp de potência nominal, foram escolhidos para compor os dispositivos de sombreamento. A Tab. 3 apresenta as especificações técnicas dos módulos adotados.

## 2.3 Avaliação do consumo energético para refrigeração

O estudo do consumo energético para refrigeração do Escritório 1 foi realizado utilizando os resultados anuais em kWh fornecidos pelo *software* EnergyPlus™. Foi analisada a relação de consumo energético entre os diferentes cenários, identificando a variação no consumo de energia de acordo com a posição do sistema de sombreamento.

## 2.4 Estimativa de geração energética e verificação do PR

O *software* PVSyst® foi utilizado para o cálculo de estimativa de geração energética e desempenho do sistema (*Performance Ratio* – PR) dos dispositivos de sombreamento fotovoltaicos (Mermoud, 2019).

Tabela 3 – Especificações técnicas dos módulos selecionados (STC).

Fabricante	First Solar
Modelo	FS-6440
Tecnologia	CdTe
Dimensões	2009 x 1232 mm
Espessura	49 mm
Peso	36 kg
Moldura	Alumínio anodizado
Vidro frontal	2,8 mm
Vidro traseiro	2,2 mm
Encapsulamento	Material laminado com vedação de borda
P <sub>nom</sub>	440 W
Eficiência	17,8%
V <sub>mpp</sub>	184,7 V
I <sub>mpp</sub>	2,38 A
V <sub>oc</sub>	220 V
I <sub>sc</sub>	2,55 A

Fonte: *Datasheet* do módulo FS-6440 (First Solar, 2019).

Foram especificados os dados de irradiação global horizontal do Atlas Brasileiro de Energia Solar para as cidades de Florianópolis-SC, São Paulo-SP, Brasília-DF, Salvador-BA, Recife-PE e Belém-PA (Pereira et al., 2017). Os dados de irradiação solar inclinada foram calculados pelo próprio *software* a partir do modelo de transposição de Perez-ineichen (Perez et al., 1990, 1987). Foram definidos a potência instalada do sistema, o modelo dos módulos FV, o *layout* dos dispositivos de sombreamento, os inversores e as *strings* elétricas. A partir desses dados e da volumetria 3D dos brises fotovoltaicos, foram determinados a geração de energia anual e o PR do sistema FV para cada cenário.

O PVsyst® estima diversas perdas de desempenho de sistemas FV, como perdas por níveis de irradiação incidente no plano dos módulos, sombreamento, sujeira, temperatura, entre outras. Como neste trabalho o objetivo foi entender as influências dos dispositivos de sombreamento fotovoltaicos no consumo de energia por resfriamento e no PR dos sistemas FV, possíveis elementos do entorno da edificação, causadores de sombreamento nos sistemas, foram desconsiderados para que as perdas não interferissem no entendimento dos resultados.

Alguns dados de perdas padrão do próprio PVsyst® foram utilizados, e outros inseridos. A Tab. 4 mostra os dados de perdas considerados para as simulações.

Tabela 4 – Dados de perdas considerados para as simulações do PVsyst®.

PERDAS	VALORES
Fator de perda térmica	20 W/m².K
Perda ôhmica da fiação	1,5%
Perda de qualidade do módulo	2,5%
Perdas por incompatibilidade do módulo	0,8%
Sujidade	3,0%
Efeito do ângulo de incidência	0,05
Fator de degradação	0,4%

Após a simulação de estimativa de geração de energia, os resultados foram comparados com as melhores situações de consumo de energia para refrigeração do Escritório 1 de cada cidade analisada no estudo, com o objetivo de avaliar o potencial dos dispositivos de sombreamento analisados para suprir o consumo de energia do modelo.

## 2.5 Custo Nivelado de Energia (LCOE) dos sistemas fotovoltaicos

O Custo Nivelado de Energia (*Levelized Cost of Electricity* – LCOE) foi calculado conforme a Eq. (1) e pode ser definido como a soma de todos os custos durante a vida útil do sistema dividida pela energia gerada durante esse mesmo período, ou seja, o custo da energia fotovoltaica gerada.

É um indicador calculado com o objetivo de ser comparado com a tarifa de energia da concessionária. Como o LCOE considera todos os custos esperados ao longo da vida útil de um sistema FV, se o valor encontrado for menor que a tarifa da concessionária, significa que existirá lucro ao final da vida útil do sistema. Já se for maior, tem-se um prejuízo.

$$LCOE = \frac{(C_0 + \sum_{n=1}^T \frac{C_n \cdot (1+i)^{n-1}}{(1+TMA)^n})}{\sum_{n=1}^T \frac{E_{FV} \cdot (1+i)^{n-1} \cdot (1-d)^n}{(1+TMA)^n}} \quad (1)$$

Onde:

$LCOE$  = Custo Nivelado de Energia, em R\$/kWh;

$C_0$  = investimento inicial, em R\$;

$T$  = duração total, em anos;

$n$  = período em questão, em anos;

$C_n$  = custos anuais para manutenção, operação e reposição de equipamentos do sistema, em R\$;

$TMA$  = Taxa Mínima de Atratividade, em %;

$E_{FV}$  = geração de energia fotovoltaica anual, em kWh;

$i$  = variação anual da tarifa energética, em %;

$d$  = taxa de degradação da geração de energia fotovoltaica, em %.

Neste estudo foi considerado um fluxo de caixa com duração de 30 anos, o que corresponde as expectativas e anúncios de alguns fabricantes sobre novos períodos de garantia para o futuro próximo.

Todas as saídas de recursos financeiros do fluxo de caixa foram calculadas em função da potência instalada do sistema FV, da seguinte maneira:

a) Investimento inicial:  $R\$4,25/Wp - 10\% + R\$135/m^2$ ; a média do custo inicial de um sistema FV de CdTe, conforme informado por empresas instaladoras, é de  $R\$4,25/Wp$ , no entanto 10% desse valor corresponde ao custo de uma estrutura metálica padrão para fixação de módulos (Instituto Ideal, 2019). Como neste trabalho os módulos serão fixados em fachadas, o custo da estrutura muda para uma média de mercado de  $R\$135/m^2$ . Por isso, após a subtração dos 10%, foi acrescentado o custo da estrutura para fixação dos módulos em fachadas.

b) Reposições de equipamentos: reposição de inversores a cada 10 anos, tendo cada reposição um custo de 19% do investimento inicial (Instituto Ideal, 2019);

c) Gastos com operação e manutenção: 1% do investimento inicial, contabilizado anualmente (Lacchini e Rütther, 2015);

A única entrada, ou receita do fluxo de caixa, é a geração de energia anual multiplicada pela tarifa de energia, ou seja, quanto estará sendo economizado na conta de energia elétrica, já considerando as variações da tarifa ao longo dos anos e a taxa de degradação da geração de energia pelo sistema fotovoltaico. Considerou-se uma variação de tarifa energética de 6% ao ano (a.a.) e uma taxa de degradação de geração de energia de 0,7% a.a., conforme resultados obtidos nos ensaios realizados nos estudos de Solís-Alemán et al. (2019), para módulos de CdTe.

A TMA representa o percentual mínimo de retorno que um investimento deve gerar para ser aceito. Para este estudo, foi utilizada uma taxa de 3,4% a.a., que é o rendimento da poupança em vigor no Brasil (Banco Central do Brasil, 2019).

Após o cálculo do LCOE dos sistemas FV, o indicador foi comparado com a tarifa de energia vigente em cada cidade analisada, para avaliar a viabilidade econômica dos sistemas FV como dispositivos de sombreamento em fachadas.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Definição das fachadas para a integração dos brises e layout dos sistemas FV

A Fig. 3 mostra os resultados de radiação solar incidente nas fachadas Norte (N), Leste (L), Oeste (O) e Sul (S) para as seis cidades analisadas.

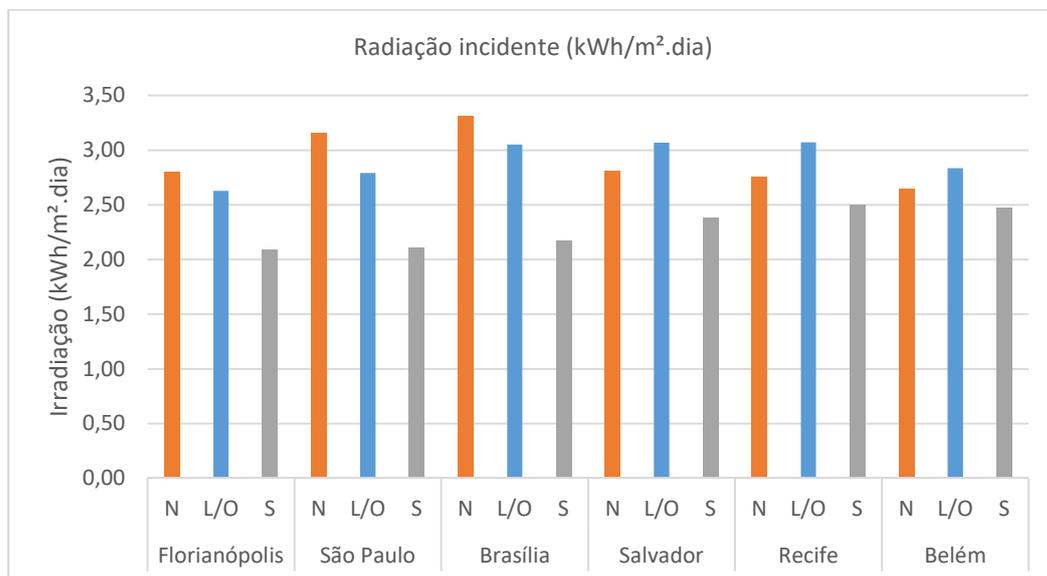


Figura 3 – Radiação solar incidente nas fachadas N, L/O e S das seis cidades analisadas.

Para as cidades de Florianópolis, São Paulo e Brasília, a fachada Norte é a que recebe a maior quantidade de radiação solar anual, portanto os dispositivos de sombreamento foram integrados nessa fachada. Já nas cidades de Salvador, Recife e Belém, os brises foram propostos para a fachada Oeste, já que essa é a que recebe os maiores índices anuais de radiação solar nesses locais.

Cada pavimento tipo recebeu um brise composto por 10 módulos FV. A área total de brises é de 125,55 m<sup>2</sup> e a potência instalada total dos sistemas é de 22 kWp.

### 3.2 Influências dos afastamentos dos brises no consumo por refrigeração

As diferentes distâncias dos dispositivos de sombreamento em relação às fachadas tiveram uma influência significativa no consumo por refrigeração, principalmente se for considerado que esta foi a única estratégia tomada para redução deste consumo.

A Fig. 4 apresenta os resultados da simulação de consumo por refrigeração para as cidades que tiveram integração dos brises na fachada Norte (Florianópolis, São Paulo e Brasília), para os cinco cenários estudados. O consumo por refrigeração diminui à medida que se afasta os dispositivos de sombreamento da edificação, uma vez que o afastamento promove um maior sombreamento do escritório 1, reduzindo o ganho de calor do ambiente através dos elementos translúcidos. Portanto, o cenário 1 apresentou os maiores consumos e o cenário 5, os menores. Para a cidade de Florianópolis, o cenário 5 representou uma redução de 6,0% (redução de 1608 kWh/ano) no consumo em relação cenário 1. Já para São Paulo essa redução foi de 6,5% (redução de 1463 kWh/ano), e para Brasília, 5,5% (redução de 1579 kWh/ano).

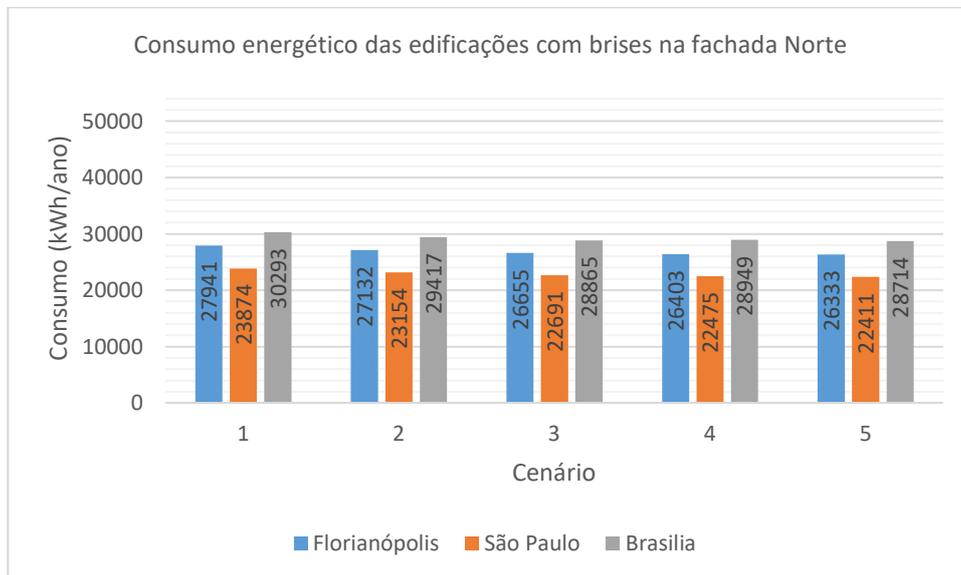


Figura 4 – Consumo de refrigeração das edificações com brises na fachada Norte para os cinco cenários.

A carga térmica interna das edificações nas cidades de Recife, Salvador e Belém é mais elevada, o que resultou em um maior consumo de energia. Contudo, da mesma forma que nas cidades de Florianópolis, São Paulo e Brasília, é possível observar que, à medida que se afasta o sombreamento da edificação, há uma redução do consumo. A Fig. 5 apresenta os resultados da simulação de consumo por refrigeração para as cidades que tiveram integração dos brises na fachada Oeste (Recife, Salvador e Belém), para os cinco cenários estudados. Para Recife o cenário 5 obteve 5,5% de redução em relação ao cenário 1 (redução de 2611 kWh/ano). Para Salvador essa redução foi de 6,0% (redução de 2662 kWh/ano) e para Belém, de 5,5% (redução de 2614 kWh/ano).

### 3.3 Estimativa de geração energética e PR

As simulações realizadas no PVsyst® mostraram que o desempenho dos sistemas FV (PR) não sofreu influências das alterações da distância dos brises em relação às fachadas, já que o *software* considera o fator de perda térmica constante (20 W/m<sup>2</sup>.K) para sistemas FV semi-integrados, independente da distância entre a superfície de fixação e os módulos FV, ou seja, desconsidera as variações da profundidade da câmara de ar existente atrás dos módulos FV. Portanto, os resultados de geração de energia anual foram os mesmos para os cinco cenários estudados, em cada cidade. A Fig. 6 mostra a geração de energia anual para as seis cidades analisadas e os respectivos PRs.

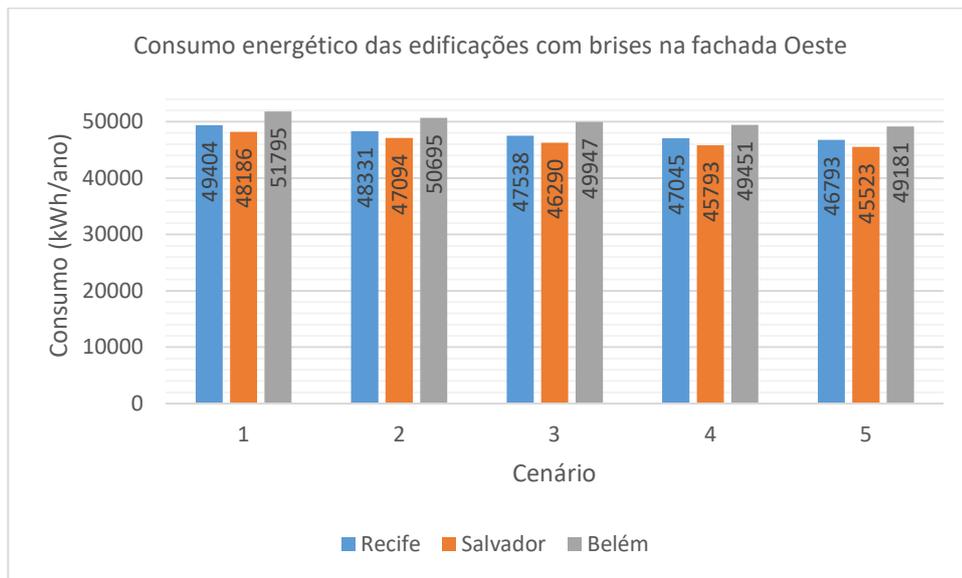


Figura 5 – Consumo de refrigeração das edificações com brises na fachada Oeste para os cinco cenários.

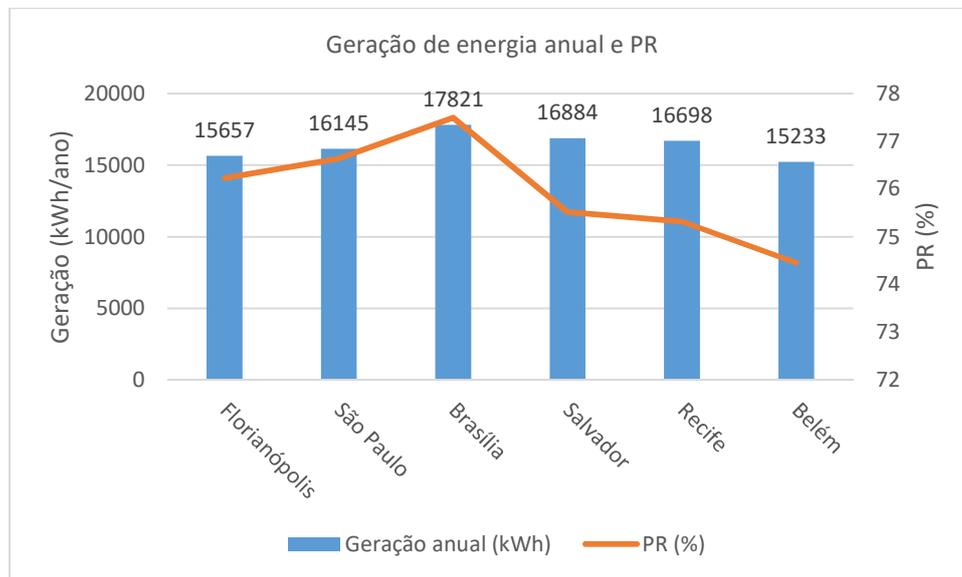


Figura 6 – Geração de energia anual e PRs para as seis cidades analisadas.

Os valores de geração de energia se mostraram homogêneos entre as cidades (15657 kWh/ano para Florianópolis, 16145 kWh/ano para São Paulo, 17821 kWh/ano para Brasília, 16884 kWh/ano para Salvador, 16698 kWh/ano para Recife e 15233 kWh/ano para Belém), o que indica que a integração de sistemas FV em fachadas possui potencial parecido para geração de energia em todo o país. Os resultados de PR foram significativos para todas as cidades analisadas: 76,2% para Florianópolis, 76,6% para São Paulo, 77,5% para Brasília, 75,5% para Salvador, 75,3% para Recife e 74,5% para Belém. Destaca-se que PRs típicos de sistemas instalados em coberturas variam entre 80 e 90% (ISE, 2019).

Isso mostra que a utilização de módulos FV em fachadas possui um alto potencial para geração de energia em todo o país, apesar das diferenças de médias anuais de irradiação global horizontal entre as cidades (Pereira et al., 2017).

### 3.4 Comparação da geração com o consumo de energia

A Fig. 7 mostra a relação entre as gerações anuais dos dispositivos de sombreamento fotovoltaicos e os menores consumos anuais para refrigeração do Escritório 1 (cenário 5), para as seis cidades analisadas.

Na cidade de Florianópolis a geração dos brises fotovoltaicos pode atender até 59% do consumo anual, em São Paulo até 72% e em Brasília, até 62%. Esses percentuais são bastante interessantes para o incentivo de projetos da aplicação de módulos fotovoltaicos em fachadas.

Já os resultados para as demais cidades não foram tão atrativos. A geração de energia pelos dispositivos de sombreamento atende apenas a 37%, 36% e 31% do consumo de ar condicionado para as cidades de Salvador, Recife e Belém, respectivamente. Isso se deve principalmente a alta demanda por refrigeração nesses locais, já que a geração de energia anual é bastante parecida para todas as seis cidades. Portanto, o ideal seria aplicar alguma outra estratégia de eficiência energética para reduzir ainda mais essa demanda por refrigeração.

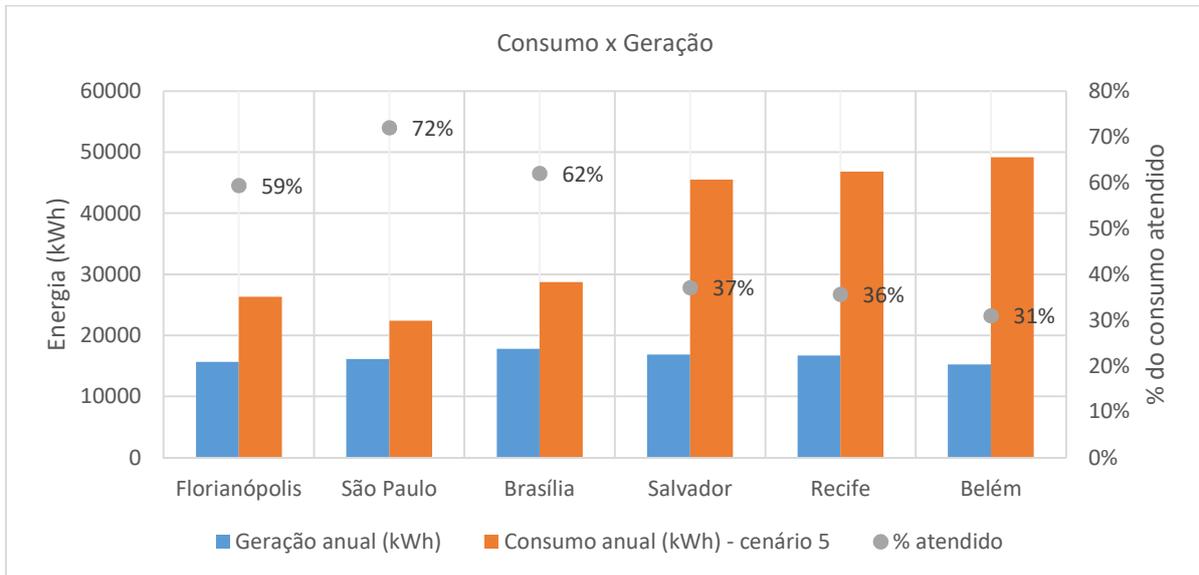


Figura 7 – Relação entre as gerações anuais e os consumos para refrigeração do cenário 5.

### 3.5 Custo Nivelado de Energia (LCOE) dos sistemas FV

A Fig. 8 apresenta as tarifas vigentes para as cidades de Florianópolis, São Paulo, Brasília, Salvador, Recife e Belém (ANEEL, 2019b, 2019c, 2019d, 2019e, 2019f, 2019g), e o LCOE calculado para os sistemas FVs.

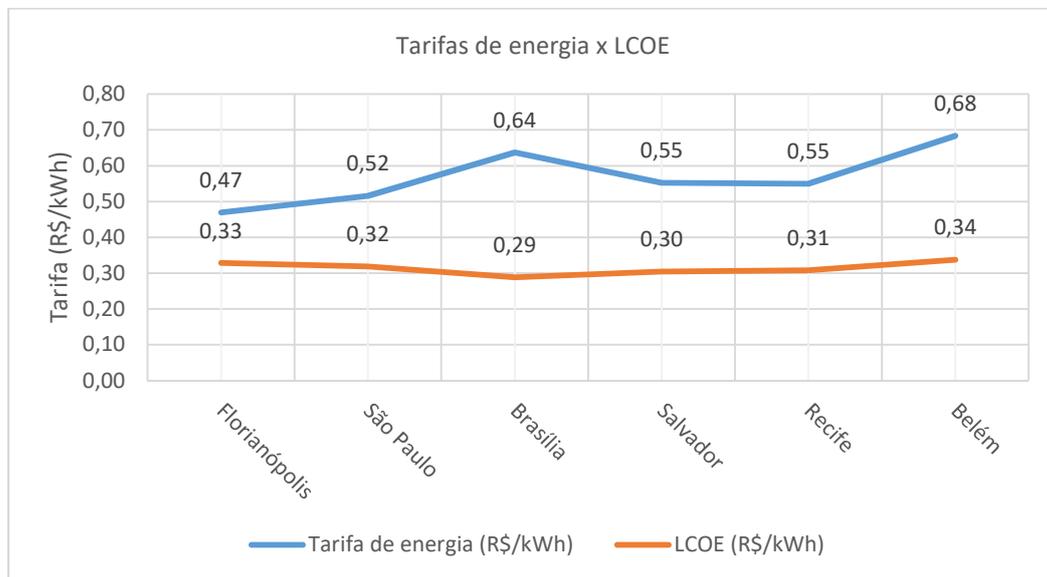


Figura 8 – Comparação das tarifas de energia com os LCOEs calculados para cada cidade.

Os LCOEs obtidos para todas as cidades foram menores do que as tarifas vigentes. Enquanto as tarifas possuem alta variação (sendo a menor de R\$0,47/kWh para a cidade de Florianópolis e a maior de R\$0,68/kWh para Belém), os valores de LCOE se mostraram mais homogêneos, com variações entre R\$0,29/kWh e R\$0,34/kWh.

Brasília obteve os maiores benefícios com a integração dos brises fotovoltaicos, já que a alta contribuição da geração de energia em relação ao consumo por refrigeração (62%) está associada a uma alta tarifa de energia (R\$0,64/kWh) e o menor LCOE alcançado (R\$0,29/kWh).

A média de redução entre as tarifas vigentes e os LCOEs calculados foi de 56%, o que mostra que a utilização de módulos fotovoltaicos como dispositivos de sombreamento em fachadas além de auxiliar na redução do consumo de energia da edificação, possui um alto potencial para a geração de energia com benefícios econômicos.

#### 4 CONCLUSÕES

O presente estudo mostrou que a utilização de módulos fotovoltaicos como dispositivos de sombreamento em fachadas pode auxiliar na redução do consumo de edificações, além de possuir um alto potencial para geração de energia com benefícios econômicos em todo o país.

Um edifício comercial de cinco pavimentos foi analisado para seis cidades brasileiras. Um dos escritórios da edificação foi modelado e simulado com aberturas e brises compostos por módulos FV nas fachadas Norte ou Oeste. Foram desenvolvidos cinco cenários de simulações, com variações nas distâncias (d) entre os brises e as fachadas. O objetivo foi analisar a demanda energética para refrigeração e o desempenho (*Performance Ratio* – PR) dos sistemas FV de cada cenário, para as seis cidades. Em seguida foi estudado como essa demanda se relacionou com a geração energética, e o Custo Nivelado de Energia (*Levelized Cost of Electricity* – LCOE) foi calculado e comparado com as tarifas de energia vigentes em cada cidade, para avaliar a viabilidade econômica dos brises propostos.

A escolha da fachada para a instalação dos brises baseou-se nos valores de radiação solar incidente nas fachadas em cada cidade. Em Florianópolis, São Paulo e Brasília, os brises foram propostos para a fachada Norte, já em Salvador, Recife e Belém, para a fachada Sul.

As simulações do EnergyPlus™ mostraram que o consumo de energia para refrigeração reduz à medida que se afasta os dispositivos de sombreamento da edificação, portanto o cenário 1 apresentou os maiores consumos e o cenário 5, os menores.

As simulações do PVsyst® mostraram que o PR não sofreu influências das alterações da distância dos brises em relação às fachadas. Os valores de geração de energia foram homogêneos entre as cidades e os resultados de PR foram significativos se considerarmos que os sistemas estão sendo aplicados em fachadas.

Em Florianópolis, a geração dos brises FV pode atender até 59% do consumo anual de refrigeração, em São Paulo até 72% e em Brasília, até 62%. Já em Salvador, Recife e Belém, devido à alta demanda por refrigeração, a geração de energia consegue atender apenas a 37%, 36% e 31% do consumo de ar condicionado, respectivamente.

Os LCOEs obtidos para todas as cidades foram menores do que as tarifas vigentes em uma média de 56%. Os valores variaram entre R\$0,29/kWh e R\$0,34/kWh. Portanto, existirá lucro ao final da vida útil dos sistemas propostos para todas as cidades estudadas.

As análises evidenciaram que entender a relação do funcionamento dos dispositivos de sombreamento com a geração de energia é de extrema importância para refletir na redução do consumo de energia da edificação e no aumento do percentual de atendimento desse consumo pela geração de energia fotovoltaica.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

#### REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2019a. BIG - Banco de Informações de Geração [WWW Document]. URL <https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> (accessed 12.11.19).
- ANEEL, 2019b. Resolução Homologatória nº 2.593, de 20 de agosto de 2019.
- ANEEL, 2019c. Resolução Homologatória nº 2.568, de 03 de julho de 2019.
- ANEEL, 2019d. Resolução Homologatória nº 2.625, de 22 de outubro de 2019.
- ANEEL, 2019e. Resolução Homologatória nº 2.533, de 16 de abril de 2019.
- ANEEL, 2019f. Resolução Homologatória nº 2.535, de 23 de abril de 2019.
- ANEEL, 2019g. Resolução Homologatória nº 2.588, de 06 de agosto de 2019.
- ANEEL, 2015. Resolução Normativa nº 687.
- ANEEL, 2012. Resolução Normativa nº 482.
- Banco Central do Brasil, 2019. Remuneração dos Depósitos de Poupança.
- Custódio, I.P., 2019. Analysis of Technical and Economic Feasibility of a Mini Solar Photovoltaic Generator Integrated on University Campus Building Envelopes. Universidade Federal de Santa Catarina.
- DOE, 2019. EnergyPlus 9.1.0.
- EPE, 2019. Balanço Energético Nacional 2019: Relatório síntese, ano base 2018.
- First Solar, 2019. First Solar Series 6.
- Frontini, F., Munari Probst, M.C., Scognamiglio, A., Roecker, C., Farkas, K., Maturi, L., Zanetti, I., 2012. IEA SHC Task 41: Solar energy systems in architecture. Integration criteria and guidelines.

- Instituto Ideal, 2019. O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída FV - Edição 2019.
- ISE, 2019. Photovoltaics Report.
- LABSOL/UFRGS, 2009. RADIASOL.
- Lacchini, C., Rüther, R., 2015. The influence of government strategies on the financial return of capital invested in PV systems located in different climatic zones in Brazil. *Renew. Energy* 83, 786–798. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.05.045>
- Lopez, C.P., Frontini, F., Bonomo, P., Scognamiglio, A., 2014. PV and Façade Systems for the Building Skin: analysis of design effectiveness and technological features. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3613–3618.
- Mermoud, A., 2019. PVsyst 6.8.5.
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Gonçalves, A.R., Costa, R.S., Lima, F.J.L., Rüther, R., Abreu, S.L., Tiepolo, G.M., Pereira, S.V., Souza, J.G. de, 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos - Brasil.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Sol. Energy* 44, 271–289. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D., 1987. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Sol. Energy* 39, 221–231. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(87\)80031-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80031-2)
- Sánchez, E., IZARD, J., 2015. Performance of photovoltaics in non-optimal orientations: An experimental study. *Energy Build.* 87, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.035>
- Solís-Alemán, E.M., de la Casa, J., Romero-Fiances, I., Silva, J.P., Nofuentes, G., 2019. A study on the degradation rates and the linearity of the performance decline of various thin film PV technologies. *Sol. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.067>
- Sorgato, M.J., Schneider, K., Rüther, R., 2018. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. *Renew. Energy* 118, 84–98. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.10.091>
- Uribe, D., Bustamante, W., Vera, S., 2018. Potential of perforated exterior louvers to improve the comfort and energy performance of an office space in different climates. *Build. Simul.* 11, 695–708. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0435-y>
- Zhang, X., Lau, S.K., Lau, S.S.Y., Zhao, Y., 2018. Photovoltaic integrated shading devices (PVSDs): A review. *Sol. Energy* 170, 947–968. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.067>

## PHOTOVOLTAIC SHADING DEVICES: RELATIONS BETWEEN MULTIFUNCTIONALITY AND FEASIBILITY IN BRAZIL

**Abstract.** *In a Building-Integrated Photovoltaic System's (BIPV) project, one must think of the energy generation combined with the architectural quality. Therefore, the result should encompass functional, constructive and formal building characteristics. Many projects use the architectural integration of photovoltaic (PV) modules in roofs, but little attention has been paid to integration in façades and especially to the influences of PV systems in the building's rooms. The use of photovoltaic modules in façades is an innovative approach that has high potential for solar energy generation in the country. This work evaluated the influence of shading devices composed by photovoltaic modules in the façades of a commercial building model, in six Brazilian cities. The building was modeled and simulated with variations in the distance between the shading devices and the façades, in order to evaluate the changes on the cooling energy demand and on the PV system's performance. From this, the relation between this demand and the energy generation was analyzed, and the Levelized Cost of Electricity (LCOE) was calculated and compared with the current electric energy tariff in each city. The analysis showed that understanding the relationship between the operation of shading devices and energy generation is extremely important, since simple changes can reduce consumption and increase the percentage of attendance of this consumption, besides bringing economic benefits with photovoltaic energy generation.*

**Key words:** *Building-Integrated Photovoltaic Systems (BIPV), Multifunctional Photovoltaic Component, Photovoltaic Systems' LCOE*