

# VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS (FV) DE TELURETO DE CÁDMIO (CdTe) EM FACHADAS OPACAS DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL DE ESCRITÓRIOS

**Kathlen Schneider** – kathlenschneider@hotmail.com

**Marcio José Sorgato** – sorgatomarcio@gmail.com

**Ricardo Rütther** – ricardo.ruther@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC

**Resumo.** Este artigo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de módulos fotovoltaicos (FV) de telureto de cádmio (CdTe) em fachadas opacas de um modelo de edifício comercial localizado em Florianópolis – SC. O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em duas etapas: análise técnica e a análise econômica. A análise técnica buscou avaliar o desempenho energético da edificação adotada por meio de simulação computacional, analisando o consumo energético da edificação e a geração energética de sistemas FV instalados na cobertura e nas fachadas opacas (norte, leste e oeste). A análise econômica buscou avaliar a viabilidade econômica dos sistemas FV aplicados nas fachadas do edifício modelo sob, substituindo materiais de revestimento tradicionais, em relação a um sistema FV aplicado na cobertura da mesma edificação. Para isso foram analisadas três tipologias arquitetônicas do edifício modelo com diferentes materiais de revestimento nas fachadas opacas: (1) alumínio composto (ACM), (2) vidro laminado e (3) módulos FV de CdTe. Para cada tipologia foram considerados três cenários de aumento tarifário: 1% a.a., 3% a.a., 5% a.a. Quanto aos métodos de análise de viabilidade de investimento, os indicadores adotados foram o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o payback descontado. Para as tipologias e condições de análise adotadas neste trabalho, os resultados mostraram que para que a aplicação de um sistema FV em fachadas que substitua materiais convencionais de revestimento se torne economicamente atrativo em relação a um sistema FV aplicado na cobertura que atenda toda a demanda energética da edificação, é preciso que o sistema FV da fachada atenda mais do que 50% dessa demanda.

**Palavras-chave:** Fachadas FV, Simulação computacional, Viabilidade técnica e econômica

## 1. INTRODUÇÃO

Dadas as recentes ações regulatórias que possibilitam compensação da energia excedente produzida por sistemas de pequeno porte, houve um grande crescimento da geração distribuída de energia no Brasil. Uma das principais vantagens das tecnologias geradoras de energia solar fotovoltaica (FV) para a aplicação em sistemas de geração distribuída é a possibilidade de aplicá-las e/ou integrá-las ao envelope das edificações. Atualmente, existe uma grande variedade de módulos FV disponíveis no mercado e os seus custos vêm diminuindo, o que oferece a oportunidade de utilizá-los não apenas com o intuito de gerar energia, mas também por motivos estéticos (Didoné, Wagner e Pereira, 2014).

Outra contribuição dos sistemas FV integrados a edificações está relacionada com a capacidade máxima de uma rede quando o pico de demanda ocorre no período diurno. Como exemplo, pode-se citar as regiões comerciais onde as altas cargas de demanda de ar-condicionado no horário do meio-dia coincidem com o alto nível de irradiação solar. Segundo Pereira *et al.* (2006) quanto maior a demanda energética no verão em comparação com o período de inverno, maior a possibilidade de carga coincidir com a disponibilidade do recurso solar, sendo esse o comportamento típico na maioria das capitais brasileiras. Curvas de dados de consumo das áreas urbanas de todo o país mostram diferença entre as regiões com edifícios comerciais (com picos de demanda no período diurno) e nas regiões residenciais (com picos de demanda no início da noite).

As principais tecnologias FV encontradas comercialmente são os módulos de silício cristalino e os de filmes finos. Historicamente, o silício cristalino é o mais usado e comercializado (EPE, 2012). Essa tecnologia se divide em dois grupos: os monocristalinos (m-Si) e os policristalinos (p-Si). Quanto aos módulos de filmes finos, os materiais semicondutores comercialmente utilizados na sua fabricação são, normalmente, o silício amorfo (a-Si), o telureto de cádmio (CdTe) ou o disseleneto de cobre índio gálio (CIGS). Os módulos de filmes finos apresentam uma estética mais atraente do que os módulos de silício cristalino e, conseqüentemente, têm encontrado maiores possibilidades em diversas aplicações arquitetônicas, substituindo materiais na cobertura de telhados e em fachadas integradas à edificação (Rütther, 2004).

Atualmente, fachadas cortina de vidro são muito comuns em edifícios comerciais corporativos, tanto no Brasil como em outros países e, para esses casos, os módulos de filme fino se apresentam como uma boa opção de substituição de vidros tradicionais por módulos FV. O objetivo de geral deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de módulos FV de CdTe em fachadas opacas de um modelo de edifício comercial de escritórios localizado em Florianópolis-SC.

## 2. MÉTODO

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em duas etapas: análise técnica e análise de viabilidade econômica. A etapa de análise técnica é composta pelo estudo do balanço energético de um edifício comercial de escritórios, localizado em Florianópolis-SC, através de simulações computacionais do seu consumo e da sua geração energética FV. A análise econômica consiste em avaliar a viabilidade de substituir materiais convencionais de revestimento de fachadas por módulos FV de CdTe, avaliando também o impacto econômico da perda do potencial de geração energética de um sistema FV posicionado verticalmente (para o caso de instalação em fachadas) em comparação com um sistema FV em condições de inclinação e orientação mais favoráveis (para o caso de instalação em coberturas).

### 2.1 Tipologia da edificação

O edifício de escritórios utilizado na simulação computacional do desempenho energético foi modelado com o auxílio de duas ferramentas computacionais: o *SketchUp*, versão 8, que permitiu modelar a geometria do edifício e o plug-in *Legacy OpenStudio*, versão 1.0.14, que permitiu definir as características térmicas iniciais da envoltória e das superfícies da edificação.

A tipologia adotada (Fig. 1(a)) representa um edifício de escritórios de médio porte, possui um total de quatro pavimentos sendo que cada pavimento possui um pé direito de 3,5m. O edifício possui dimensões de 30 x 20 x 14m, com uma área total construída de 2.400m<sup>2</sup>, sendo que as maiores fachadas estão orientadas para o norte/sul. O percentual de abertura das fachadas (WWR) adotado foi de 40 %. Cada um dos ambientes da edificação - classificados em escritórios, circulação e banheiros - foi modelado representando uma zona térmica, somando um total de nove zonas térmicas por pavimento (Fig. 1(b)). As zonas térmicas que representam escritórios ficaram posicionadas com as suas aberturas voltadas para duas orientações diferentes com o objetivo de explorar o potencial de ventilação natural no ambiente.

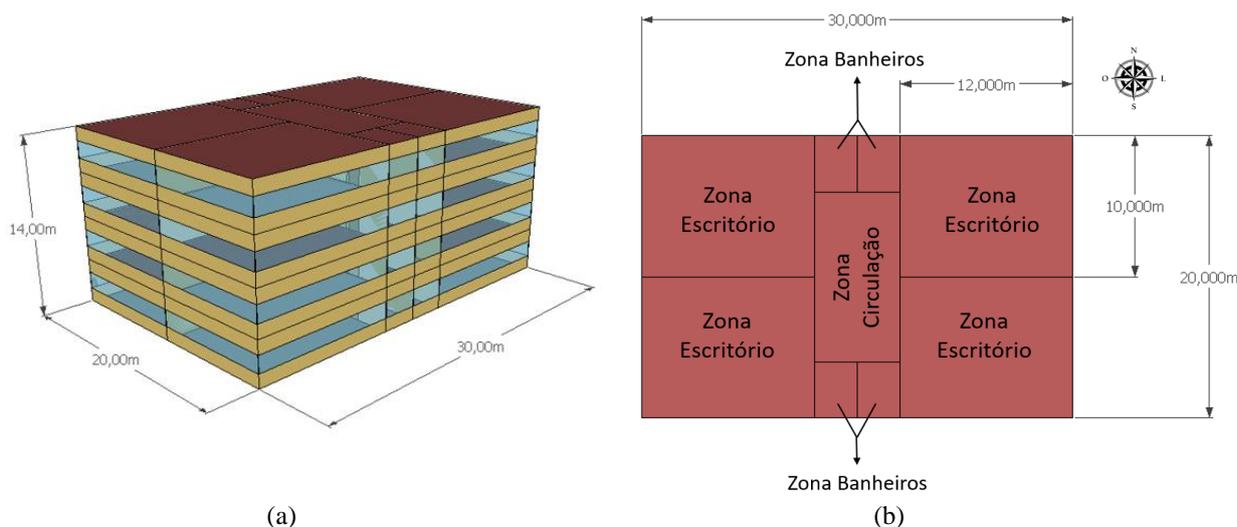


Figura 1 – (a) Tipologia do modelo de edifício de escritórios adotada, (b) Zonas térmicas adotadas

### 2.2 Análise técnica

#### 2.2.1 Simulação do consumo energético

O programa escolhido para a simulação computacional do consumo energético do edifício foi o *EnergyPlus*, versão 8.7.0. Além de ser um dos programas mais utilizados em simulações de desempenho termo-energético de edificações, o *EnergyPlus* atende aos requisitos da ASHRAE Standard 140/2011 e foi por esse motivo escolhido para o desenvolvimento deste trabalho.

O arquivo climático adotado na simulação foi do tipo TRY (*Test Reference Year*) para a cidade de Florianópolis-SC, localizada a 27°35'49" sul e 48°32'56" oeste. Os arquivos climáticos do tipo TRY representam um ano de dados médios sem extremos de temperatura de uma série de 10 anos.

As trocas de calor entre o ambiente externo e interno de uma edificação são determinadas, em grande parte, pelos componentes da envoltória (paredes, coberturas, aberturas e pisos). Os componentes da envoltória aqui adotados atendem as recomendações de valores das propriedades térmicas apresentadas pela NBR 15220-2. Os cálculos de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) são realizados pelo próprio *EnergyPlus* e também atendem aos métodos de cálculo propostos pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

A parede externa é composta por argamassa de revestimento (2,5 cm), tijolo cerâmico de oito furos (10 x 20 x 20 cm), assentado na sua menor dimensão, e argamassa de revestimento interna (2,5 cm). As grandezas térmicas da parede externa são  $U = 2,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e  $CT = 146,0 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ . A cobertura é composta por telha de fibrocimento (0,7 cm), lâ de vidro (6,5cm), laje armada por blocos cerâmicos (12 cm) e argamassa de revestimento interna (2,5 cm) com transmitância térmica de  $0,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e capacidade térmica de  $113 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ . O componente construtivo modelado para o piso é composto por uma camada de piso cerâmico, argamassa de nivelamento (2,0 cm), laje armada de blocos cerâmicos (12,0 cm), totalizando uma resistência térmica de  $0,1187 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$  (esse valor não considera as resistências superficiais). As paredes externas e a cobertura foram simuladas com valores de absorvância solar de 0,4 e 0,5 respectivamente. Quanto às aberturas, essas são constituídas por vidro simples de 6mm de espessura, transmitância térmica de  $5,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e fator solar de 0,35.

As cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos) também são fatores bastante influentes no desempenho termo-energético de uma edificação. Quanto à densidade de pessoas, considerou-se  $14,7 \text{ m}^2/\text{pessoa}$  – valor encontrado no estudo realizado por Santana (2006) ao pesquisar o padrão de ocupação em edifícios de escritórios em Florianópolis. Foi adotado 108 W como ganho de calor por pessoa definido de acordo com o nível de atividade padrão realizado em um escritório – valor obtido através da tabela de taxas metabólicas de diversas atividades determinado pela ASHRAE 55. Quanto à fração radiante, que é responsável por definir a quantidade de radiação de onda longa emitida por pessoa em uma zona, adotou-se 0,3.

O sistema de iluminação artificial consome energia e parte da energia é dissipada como calor para o ambiente. A densidade de potência de iluminação limite ( $DPI_L$ ) para cada ambiente usada na simulação do edifício foi definida seguindo o que é proposto pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) para que um edifício possa atingir o nível A de eficiência. Portanto, para as zonas térmicas dos escritórios, adotou-se uma  $DPI_L$  de  $9,7 \text{ W/m}^2$ . Para as áreas de circulação e banheiros, adotou-se se uma  $DPI_L$  de  $7,10 \text{ W/m}^2$  e  $5 \text{ W/m}^2$ , respectivamente. A fração radiante e a fração visível adotadas foram ambas 0,3.

Para a densidade de carga interna (DCI) dos equipamentos adotou-se o valor médio obtido por Santana (2006). Sendo assim, foi considerado  $9,7 \text{ W/m}^2$  de DCI dos equipamentos nas zonas de térmicas que representam os escritórios e a fração radiante adotada foi de 0,3. Também foi considerada a carga de energia consumida pela bomba d'água do edifício, ligada 5 horas por dia nos dias úteis, consumindo 400 W.

Quanto aos horários de ocupação, iluminação e uso dos equipamentos, foram adotados os *schedules* obtidos no estudo de Santana (2006). Finais de semana e feriados foram considerados como dias sem ocupação, uma vez que não há expediente de trabalhos nesses dias.

A edificação foi simulada sob condições de operação híbrida, ou seja, com ventilação natural durante os períodos em que o ambiente atende às condições de intervalo de operação híbrida determinadas e com condicionamento artificial para quando essas condições não são atendidas. Sendo assim, os intervalos de operação híbrida determinaram o momento em que o sistema de condicionamento artificial é acionado para o resfriamento ou aquecimento dos ambientes. Os valores de limite máximo (desconforto devido ao calor) e os valores de limite mínimo (desconforto devido ao frio) adotados foram  $24^\circ\text{C}$  e  $18^\circ\text{C}$ , respectivamente.

Sendo assim, as condições de operação híbrida são controladas de acordo com a temperatura interna da zona térmica sob análise e as condições determinadas pelo recurso de simulação de controle avançado. Para desenvolver tal simulação no *EnergyPlus* usou-se o recurso de controle avançado *Energy Management System* (EMS). O EMS possibilita a leitura e a troca de informações durante o processamento da simulação a cada *timestep*. O *timestep* adotado foi de 12 por hora (a cada 5 minutos). As zonas térmicas simuladas com operação híbrida foram as que representam os escritórios e o desligamento do sistema de condicionamento artificial foi vinculado ao término da ocupação do ambiente. O algoritmo desenvolvido foi baseado no algoritmo apresentado por Sorgato (2015).

Para a simulação do sistema de condicionamento de ar, adotou-se o objeto de simulação *HVACTemplate:Zone:PThp*, o qual modela um sistema *Packaged Terminal Heat Pump* reproduzindo o desempenho de condicionadores de ar do modelo *Split*, funcionando com os fundamentos de bomba de calor. Esse sistema de condicionamento artificial foi considerado apenas para as zonas térmicas que representam os escritórios. O Coeficiente de Performance (COP) adotado, tanto para resfriamento quanto para aquecimento, foi de 3,5 – valor dentro do intervalo sugerido pelo INMETRO para que um equipamento condicionador de ar atinja o nível “A” de eficiência.

A simulação da ventilação natural no *EnergyPlus* foi modelada com o objeto *AirflowNetwork*, o qual permite calcular o fluxo de ar entre as zonas térmicas e o ambiente externo. Para isso são determinados links (entradas) do fluxo de ar, as características do entorno da edificação, as condições de abertura das janelas e portas e as condições de ventilação (LABEEE, 2013). Os coeficientes de pressão adotados foram calculados pelo próprio *EnergyPlus* por meio da opção *SurfaceAverageCalculation*, a qual permite ao programa calcular coeficientes de pressão de vento nas superfícies das fachadas e cobertura. O coeficiente de pressão de descarga indica a efetividade da fração de ar que passa por uma janela ou porta quando essas estão abertas ou fechadas e o seu valor adotado foi de 0,6. O coeficiente de fluxo de ar pelas frestas quando a janela está fechada foi de  $0,001 \text{ kg/s}$  ( $n=0,65$ ) e a rugosidade do entorno considerada foi de 0,33.

### 2.2.2 Simulação da geração energética

A simulação da geração FV foi realizada pelo programa *PVSystem*, versão 6.47 (PVSYST SA, 2016). O arquivo climático sintético usado na simulação foi gerado pelo próprio *PVSystem* com base nos dados de irradiação global e difusa obtidos no banco de dados do projeto SWERA (Pereira *et al.*, 2006).

As áreas de superfície disponíveis estudadas para a instalação do sistema FV foram: (1) a área total de cobertura e (2) as porções opacas das fachadas do edifício. A cobertura apresenta 600m<sup>2</sup> de área disponível, enquanto que as fachadas opacas voltadas para o norte/sul apresentam, cada uma, 260m<sup>2</sup> disponível e as fachadas leste/oeste, por sua vez, possuem 174m<sup>2</sup>.

Foi adotado o módulo de filme fino de CdTe com potência nominal de 117,5 Wp. Com o auxílio do programa *Skelion*, um *plugin* que auxilia na modelagem do design de sistemas FV no *SketchUp* (TRIMBLE, 2012), foi contabilizada a quantidade de módulos FV que é possível instalar em cada faixa de área de fachada opaca e em toda a área disponível de cobertura. Foram contabilizados 768 módulos na cobertura (totalizando 90,2 kWp), 264 nas fachadas norte/sul (31 kWp) e 176 módulos nas fachadas leste/oeste (20,7 kWp). Como os arranjos FV apresentaram potências nominais diferentes, diferentes inversores foram adotados no dimensionamento de cada sistema. Optou-se por usar todos os inversores do mesmo fabricante, sendo necessário adotar três modelos diferentes (8,6 kW, 20 kW e 27,6 kW).

Como regra geral, em Florianópolis a inclinação e orientação ideais dos módulos para que um sistema FV tenha o seu melhor desempenho de produção ao longo do ano é de 27° voltado para o norte. Considerando o modelo do edifício sob análise, a instalação de um sistema FV com inclinação de 27° instalado na sua cobertura seria tecnicamente inviável devido à altura exagerada que essa inclinação proporcionaria ao sistema. Portanto, foi definido um sistema FV na cobertura com a inclinação de 10° voltado para o norte. Quanto aos sistemas das fachadas, foram avaliados três sistemas FV, um na fachada norte, outro na fachada leste e outro na fachada oeste. A fachada sul foi desconsiderada desta análise pelo fato de o seu desvio azimutal ser muito desfavorável para o aproveitamento da irradiação solar ao longo de um ano. A Tabela 1 resume o detalhamento de cada sistema FV avaliado.

Tabela 1 – Detalhamento dos sistemas FV analisados.

	<b>Cobertura</b>	<b>Fachada Norte</b>	<b>Fachada Oeste</b>	<b>Fachada Leste</b>
Modelo Módulo	First Solar 117,5Wp	First Solar 117,5Wp	First Solar 117,5Wp	First Solar 117,5Wp
Tecnologia Módulo	CdTe	CdTe	CdTe	CdTe
Nº de Módulos	768	264	176	176
Inclinação/ Orientação	10°/0°	90°/0°	90°/270°	90°/90°
Potência Nominal Instalada (kWp)	90,2	31,0	20,7	20,7
Modelo Inversor	ABB (20kW)	ABB (27,6kW)	ABB (8,6kW)	ABB (8,6kW)
Nº de Inversores	4	1	2	2
Módulos em Série	8	8	4	4
Nº de <i>Strings</i>	96	33	44	44

## 2.3 Análise econômica

### 2.3.1 Métodos de análise de investimento adotados

Os principais métodos de avaliação de investimentos (Hoji, 2012) e também os mais utilizados internacionalmente pelos CFOs (Chief Financial Officers) nas empresas (Graham e Harvey, 2001) são: valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e *payback* descontado. Neste contexto, esses foram os métodos de análise de investimento adotados.

O VPL é obtido pela soma de todos os valores do fluxo de caixa (entradas e saídas) trazidos para a data presente, ou seja, desconta-se o fluxo de caixa líquido de cada período futuro gerado durante a vida útil do investimento com a taxa de desconto (TD), e adiciona-se o somatório desses valores descontados ao fluxo de caixa líquido do instante inicial (Hoji, 2012). O investimento será economicamente atraente se o VPL for positivo.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma taxa que expressa a rentabilidade de um projeto e tem a função de aplicar o fator de juros sobre um valor presente para levar cada valor do fluxo caixa para uma data-base (Hoji, 2012). Em termos matemáticos, a TIR é a TD no cálculo do VPL que faz com que seu valor se anule. O investimento será economicamente atraente se a TIR for maior que a TD adotada.

O *payback* mede em quanto tempo o capital investido é recuperado. O *payback* descontado, adotado nesta análise, considera o valor do dinheiro no tempo e leva em conta a TD do investidor. Para o caso desta análise, o investimento é economicamente atraente quando o período do *payback* descontado é que o menor que o ciclo de vida do sistema FV.

### 2.3.2 Considerações para a análise econômica

As considerações adotadas foram:

- Consumidor pertencente ao Grupo B, Classe 03 (Comercial, Serviços, Outras Atividades), modalidade convencional do tipo trifásico;
- Custo de disponibilidade mensal de 100 kWh;
- Tarifa comercial adotada de 0,6349 R\$/kWh considerando incidência de impostos (PIS, COFINS e ICMS). Esse valor é referente à tarifa comercial cobrada pela CELESC em agosto/2016.
- Período de análise de investimento adotado foi de 25 anos, que é o tempo de garantia dos módulos FV apresentado pelo fabricante;
- Para as despesas anuais com operação e manutenção (O&M) do sistema FV foi considerado 1% a.a. do valor total inicial do sistema FV. Esse valor é o mesmo adotado em outros trabalhos de pesquisa em viabilidade econômica de sistemas FV integrados em edificações no Brasil (Antoniolli *et al.*, 2016; Montenegro, 2013; Santos, 2015);
- Redução de produtividade do sistema FV de 0,5% a.a.;
- A troca de inversores foi considerada a cada 10 anos ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema FV, ou seja, considerou-se que há troca dos inversores no ano 10 e no ano 20;
- A despesa com a troca de inversores foi considerada em 17% do investimento inicial do sistema, de acordo com Antoniolli *et al.* (2016); A tendência é que aconteça o barateamento da tecnologia nos anos futuros; porém essa possível diminuição de custo dos inversores não foi considerada. Também não foram considerados os custos de reajuste dos preços pela inflação e o custo da mão de obra para reposição dos inversores;
- Até a conclusão deste trabalho, o estado de Santa Catarina ainda não havia aderido ao Convênio ICMS 16/2015. Porém, foi considerado nesta análise que não há a cobrança do ICMS sobre a energia FV injetada na rede uma vez que a tendência é a isenção do ICMS seja aderida em um futuro próximo.
- A TD adotada foi o rendimento da caderneta de poupança no período entre 01/09/2015 a 31/08/2016, no valor de 7,6% (BCB, 2016).
- Foi considerado que o sistema FV está instalado sob a atual resolução normativa REN 482/2012 que estabelece o sistema de compensação de energia, também conhecido como *net-metering*.

### 2.3.3 Tipologias e cenários de análise

Foram avaliadas nesta análise econômica três tipologias arquitetônicas do modelo de edifício simulado na análise técnica (Fig. 2):

**Tipologia 1:** Edifício modelo com o sistema FV instalado em toda a área de cobertura disponível + fachadas opacas revestidas por ACM;

**Tipologia 2:** Edifício modelo com o sistema FV instalado em toda a área de cobertura + fachadas opacas revestidas com vidro laminado;

**Tipologia 3:** Edifício modelo com o sistema FV instalado apenas nas fachadas opacas voltadas para o norte, leste e oeste.

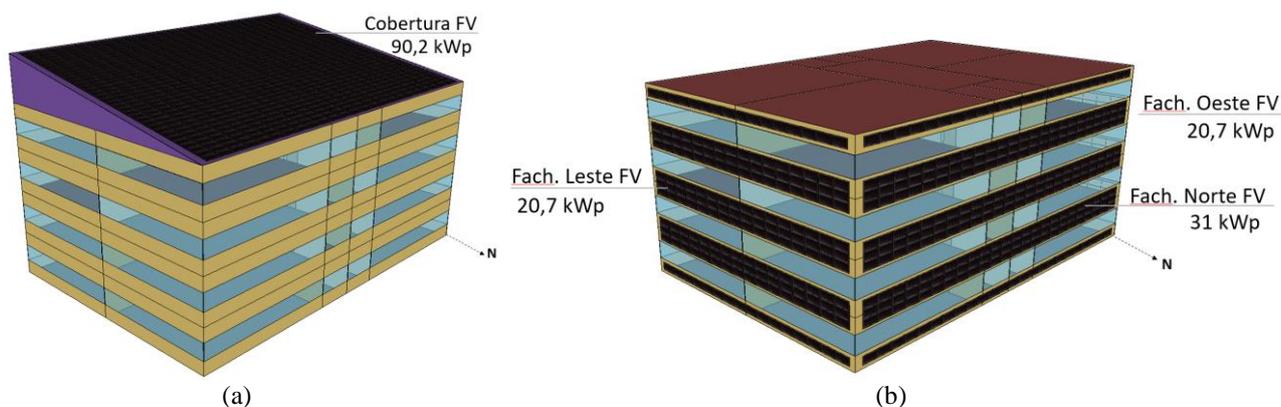


Figura 2 – (a) *Layout* representativo das tipologias 1 e 2 (b) *Layout* representativo da Tipologia 3

O intuito foi avaliar a viabilidade econômica de se substituir materiais tradicionalmente aplicados em fachadas de edifícios comerciais (como o ACM e o vidro laminado) por módulos FV. Por meio das tipologias de análise definidas, avaliou-se também o impacto econômico da perda do potencial de geração energética de um sistema FV posicionado verticalmente quando aplicado nas áreas disponíveis das fachadas opacas voltadas para norte, leste e oeste em comparação com um sistema FV em condições mais favoráveis de orientação e inclinação quando aplicado em toda a área de cobertura disponível da edificação modelo adotada.

Para cada tipologia foram considerados três diferentes cenários referentes ao ajuste anual da tarifa comercial B3. Esse intervalo permite fazer uma análise mais sensível da influência do aumento tarifário na viabilidade econômica do sistema. Os cenários analisados foram:

**Cenário 1:** Aumento tarifário de 1% a.a.;

**Cenário 2:** Aumento tarifário de 3% a.a.;

**Cenário 3:** Aumento tarifário de 5% a.a.

#### 2.3.4. Fluxo de caixa

A fim de determinar o custo do sistema FV proposto, foram considerados os fluxos de entrada e saída de caixa, correspondentes às receitas e despesas de investimento e operação durante a vida útil do sistema. Gráficamente, o fluxo de caixa considerado está representado na Fig. 3.

O Custo Inicial representa o valor monetário necessário para a aquisição e instalação de determinada tipologia de análise; a Receita corresponde ao que se economizaria por ano na fatura de energia; as Despesas os gastos anuais com energia, O&M representam os custos anuais com operação e manutenção do sistema e Inversor representa a despesa com a troca dos inversores no final do ano 10 e no final do ano 20.

As considerações quanto à Receita e às Despesas variam de acordo com o balanço energético do edifício da tipologia de análise correspondente. Se o balanço energético da edificação é negativo, ou seja, quando o edifício não é capaz de produzir toda a energia que consome, a Receita é representada pela energia gerada pelo sistema FV instalado na cobertura multiplicada pela tarifa. Enquanto que as Despesas representam a energia consumida da rede multiplicada pela tarifa. Se o balanço energético da tipologia sob análise é positivo, ou seja, quando o edifício é capaz de produzir mais energia do que consome, a Receita representa o consumo anual da edificação multiplicado pela tarifa. Já as Despesas representam o custo de disponibilidade (1200kWh/ano) multiplicado pela tarifa.

É importante frisar que o fluxo de caixa aqui desenvolvido não apresenta considerações sobre possíveis efeitos resultantes de financiamentos ou quaisquer outras medidas de incentivo, de natureza fiscal ou tributária, que eventualmente possam ser estabelecidas durante o período de vida útil do sistema.

Ano	0	1	2	...	10	...	20	...	25
<b>Fluxo de Caixa</b>	- Custo Inicial	+ Receita - Despesas - -O&M	+ Receita - Despesas - - O&M	...	+ Receita - Despesas - O&M - Inversor	...	+ Receita - Despesas - O&M - Inversor	...	+ Receita - Despesas - O&M

Figura 3 – Representação do fluxo de caixa adotado

#### 2.3.5 Custo inicial

O custo inicial de investimento para cada tipologia de análise está diretamente ligado com o tipo de material de revestimento da fachada opaca e esses valores estão detalhados na Tab. 2. O preço desses materiais foi levantado através de orçamentos feitos com fornecedores locais no período de junho a novembro de 2016. Em relação aos vidros laminados, pesquisou-se o tipo de vidro mais esteticamente semelhante aos os módulos FV da First Solar. No mercado brasileiro, em novembro de 2016, o preço do módulo FV vidro-vidro de CdTe estava em 0,39 USD/Wp - na Tab. 2 esse valor foi convertido para R\$/m<sup>2</sup> com o intuito de comparar com os preços do ACM e do vidro laminado. A taxa de câmbio do dólar considerada foi de 1 USD = R\$ 3,50 (taxa de câmbio média no ano de 2016). O vidro laminado foi o material que apresentou o maior preço, sendo esse 3.7 vezes maior que o ACM e 1.66 vezes maior que o módulo FV.

Quanto ao preço do sistema FV, foi considerado o valor obtido pela pesquisa realizada pelo IDEAL - Instituto para o Desenvolvimento de Energias Renováveis na América Latina (2017) a qual levantou os preços dos sistemas FV, em valor por faixa de potência nominal, no ano de 2016. Segundo a pesquisa, para sistemas FV com potência instalada entre 31 a 100 kWp, a média levantada com as empresas instaladoras foi de 6.150 R\$/kWp. A mesma pesquisa também investigou a composição de custos de um sistema FV: 41% dos custos é devido aos módulos FV, 23% aos inversores, 16% ao projeto e instalação, 10% às estruturas metálicas de suporte e 10% para outros componentes.

Com base nessa composição de custos, para o sistema FV da cobertura, o BOS (*Balance of System*) representou 59% do preço do sistema FV (considerando inversores, projeto e instalação, estrutura metálica de suporte e outros componentes). Quanto à estrutura metálica necessária para suportar os três materiais de revestimento de fachada sob

análise e a mão de obra para a instalação desses materiais nas fachadas, foi considerado que essas são equivalentes entre si; portanto seus respectivos custos não entraram no levantamento da análise econômica. Como consequência, o BOS para o sistema FV das fachadas representou 49% do preço do sistema FV (considerando inversores, projeto e instalação e outros componentes).

Tabela 2 – Custo inicial detalhado para cada tipologia analisada

		Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3
<b>Cobertura FV</b>	Área (m <sup>2</sup> )	600	600	600
	Preço Módulos FV (R\$/m <sup>2</sup> )	R\$ 223	R\$ 223	-
	Potência Nominal FV (kWp)	90,2	90,2	-
	BOS (R\$/kWp)	R\$ 3.629	R\$ 3.629	-
	Custo (R\$)	R\$ 460.947	R\$ 460.947	-
<b>Fachada Opaca</b>	Área (m <sup>2</sup> )	608	608	608
	Material	ACM	Vidro laminado	Módulos FV
	Preço Material (R\$/m <sup>2</sup> )	R\$ 100	R\$ 370	R\$ 222
	Potência Nominal FV (kWp)	-	-	72,4
	BOS (R\$/kWp)	-	-	R\$ 3.014
	Custo (R\$)	R\$ 60.760	R\$ 224.812	R\$ 350.051
<b>Custo inicial total</b>		<b>R\$ 521.707</b>	<b>R\$ 685.759</b>	<b>R\$ 350.051</b>

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Análise técnica

Os resultados da simulação do consumo energético anual por uso final estão apresentados na Fig. 4(a). Os equipamentos foram os responsáveis pelo maior consumo da edificação (48.932 kWh/ano), seguidos da iluminação (46.779 kWh/ano), resfriamento (15.610 kWh/ano), ventiladores (1.632 kWh/ano) e, por fim, aquecimento (141 kWh). No total, o edifício simulado consome 113.095 kWh/ano.

A Fig. 4(b) traça o perfil mensal de demanda energética e da geração dos sistemas FV da cobertura e das fachadas norte, leste e oeste juntas. Quanto à geração anual, o sistema FV da cobertura, é capaz de gerar anualmente 128.454 kWh/ano, o sistema FV da fachada norte 25.579 kWh, da fachada leste 15.381 kWh/ano e o da fachada oeste 15.353 kWh. As três fachadas juntas são capazes de gerar 56.313 kWh/ano. No balanço energético anual da edificação, o sistema FV da cobertura foi capaz de gerar 114% da energia que o edifício demanda, enquanto que o sistema FV das fachadas norte, leste e oeste juntas atendem à 50% dessa demanda.

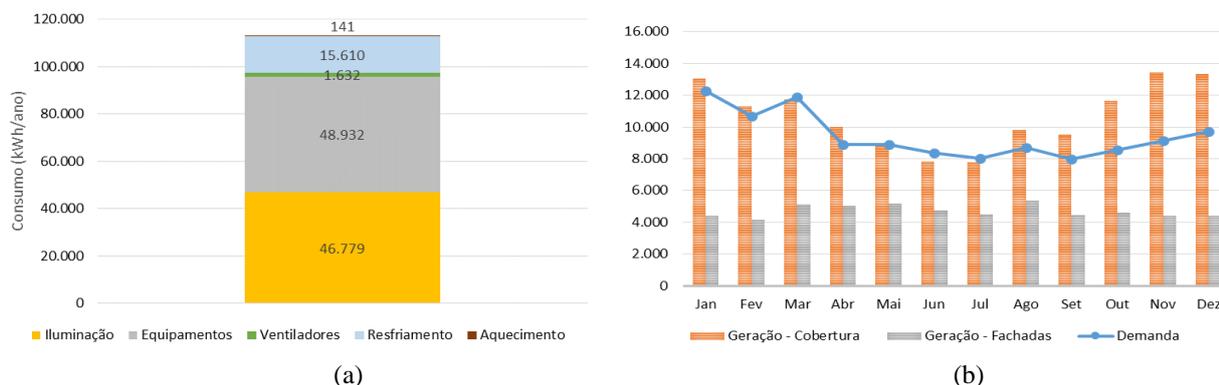


Figura 4 – (a) Consumo de energia anual por uso final, (b) Perfil mensal da demanda energética e geração FV

#### 3.2 Análise econômica

A Tipologia 1 (cobertura FV e fachada opaca revestida com ACM) e a Tipologia 2 (cobertura FV e fachada opaca revestida com vidro laminado) apresentaram ambas um balanço energético positivo, uma vez que a cobertura FV é capaz de atender 114% da demanda do edifício. Por outro lado, a Tipologia 3 (fachada opaca revestida com módulos

FV) apresentou um balanço energético negativo uma vez que o sistema FV das fachadas norte, leste e oeste foi capaz de atender 50% da demanda energética do edifício.

Dessa forma, as tipologias 1 e 2 se apresentaram economicamente viáveis para os três métodos de análise de investimento adotados (TIR, VPL e *payback* descontado) nos três cenários de aumento tarifário analisados (1% a.a., 3% a.a. e 5% a.a.). Notou-se que para ambas tipologias, o Cenário 3, com maior aumento tarifário ao ano (5% a.a.), foi o cenário economicamente mais atraente.

Por outro lado, a Tipologia 3 não se apresentou economicamente viável para nenhum dos métodos de análise de investimento adotados. Isso se deu pelo fato de que, mesmo que os sistemas FV das fachadas fosse capaz de atender à 50% da demanda energética da edificação, ainda assim as despesas anuais com o consumo de energia elétrica da rede foram bastante altas, comprometendo assim a atratividade econômica desse sistema.

A Fig. 5(a) apresenta os resultados da TIR para as três tipologias nos três cenários de análise. A Tipologia 1 apresentou os melhores resultados, com uma TIR de 12% para o Cenário 1, 14% para o Cenário 2 e 17% para o Cenário 3. A Tipologia 2 apresentou uma TIR de 9% para o Cenário 1, 11% para o Cenário 2 e 13% para o Cenário 3. A Tipologia 3 apresentou uma TIR inviável para os três cenários analisados. A Fig. 5(b) apresenta os resultados do VPL. Novamente a Tipologia 1 apresentou os melhores valores, seguida da Tipologia 2. A Tipologia 3 apresentou um VPL negativo nos três cenários de analisados.

A Tab. 3 apresenta os resultados de *payback* descontado para as três tipologias sob os três cenários de análise. A Tipologia 1 apresentou o melhor *payback*, seguida da Tipologia 2. A Tipologia 3 apresentou um *payback* superior a 25 anos, ou seja, maior do que o ciclo de vida do sistema FV.



Figura 5 - (a) Taxa interna de retorno (TIR), (b) Valor presente líquido (VPL) para as três tipologias nos três cenários analisados.

Tabela 3 – *Payback* descontado para as três tipologias nos três cenários de análise.

	Tipologia 1 (ACM)	Tipologia 2 (Vidro)	Tipologia 3 (Módulos FV)
<b>Cenário 1</b> (1% a.a.)	13 anos	21 anos	> 25 anos
<b>Cenário 2</b> (3% a.a.)	12 anos	16 anos	> 25 anos
<b>Cenário 3</b> (5% a.a.)	10 anos	14 anos	> 25 anos

#### 4. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou avaliar a viabilidade técnica e econômica de sistemas FV compostos por módulos de CdTe aplicados nas fachadas opacas voltadas para o norte, leste e oeste de um modelo de edifício comercial localizado em Florianópolis-SC. A análise técnica deste estudo avaliou o consumo energético do edifício modelo proposto por meio de simulação computacional usando o *EnergyPlus*. A análise técnica também avaliou a geração energética de um sistema FV ocupando toda a área de cobertura disponível do edifício (600 m<sup>2</sup>) e outros três sistemas FV ocupando toda a área disponível de fachadas opacas voltadas para o norte, leste e oeste (totalizando 608 m<sup>2</sup>), também por meio de simulação computacional, usando o *PVSyst*.

Na análise econômica, três métodos de avaliação de investimentos foram adotados: TIR, VPL e *payback* descontado. Foram avaliadas três tipologias arquitetônicas do modelo do edifício adotado com o intuito de analisar a viabilidade econômica de substituir materiais convencionais de revestimento de fachadas (ACM e vidro laminado) por módulos FV, assim como avaliar o impacto econômico da perda do potencial de geração energética de um sistema FV

posicionado verticalmente quando aplicado em fachadas em comparação com um sistema FV em condições mais favoráveis de orientação e inclinação quando aplicado em coberturas.

Quanto à análise técnica, no balanço energético anual da edificação, o sistema FV da cobertura foi capaz de gerar 114% da energia que o edifício demanda, enquanto que o sistema FV das fachadas norte, leste e oeste juntas atendem à 50% dessa demanda. A grande diferença de geração energética dos sistemas da cobertura e das fachadas se deve ao fato de que a área de cobertura disponível contemplou um sistema FV com maior potência nominal instalada (90,2 kWp no sistema FV da cobertura e 72,4 kWp nos três sistemas das fachadas). Além disso, o sistema FV da cobertura está em condições de inclinação e orientações mais favoráveis ao aproveitamento da irradiação solar ao longo do ano do que os sistemas FV das fachadas.

Quanto à análise econômica, a Tipologia 1 (cobertura FV + fachadas opacas revestidas por ACM) e a Tipologia 2 (cobertura FV + fachadas opacas revestidas por vidro) apresentaram custos iniciais mais altos do que a Tipologia 3 (fachadas opacas revestidas por módulos FV), sendo a Tipologia 1, 1,5 vezes mais cara que a Tipologia 3, e a Tipologia 2, 2,0 vezes mais cara que a Tipologia 3. Ainda que as tipologias 1 e 2 apresentaram um custo inicial superior ao da Tipologia 3, esse investimento apresentou-se economicamente mais atrativo, uma vez que o sistema FV da cobertura dessas tipologias (1 e 2) foi capaz de atender toda a demanda do edifício, reduzindo consideravelmente as despesas anuais da edificação com o consumo de energia elétrica da rede urbana. A Tipologia 3 apresentou o menor custo inicial de todas as tipologias porque o sistema FV, ao invés de ser implantado na cobertura, foi aplicado nas fachadas opacas, substituindo assim outro material de revestimento de fachada opaca. Como os sistemas FV das fachadas foram capazes de atender apenas 50% da demanda do edifício, as despesas anuais com consumo de energia elétrica da rede urbana foram bastante significativas fazendo com que a Tipologia 3 perdesse a sua atratividade econômica nos três métodos de análise de investimento abordados.

Portanto, dadas as tipologias e condições de análise adotadas neste trabalho, para situações nas quais um sistema FV aplicado na cobertura de uma edificação é capaz de suprir toda a demanda energética da mesma, não seria economicamente atrativo aplicar módulos FV nas fachadas do edifício substituindo materiais de revestimento convencionais para quando esse sistema FV nas fachadas é capaz de atender apenas 50% da demanda energética da edificação. Ou seja, para que a aplicação de um sistema FV nas fachadas que substitua materiais convencionais de revestimento se torne economicamente atrativo em relação a um sistema FV aplicado na cobertura que atenda toda a demanda energética da edificação, é preciso que o sistema FV da fachada atenda mais do que 50% dessa demanda. Sugere-se para trabalhos futuros avaliar quanto da demanda de um edifício que um sistema FV aplicado em fachadas precisa atender para que esse sistema se torne economicamente mais atrativo do que um sistema FV aplicado na cobertura.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005. NBR 15.220: Desempenho Térmico para Edificações. Rio de Janeiro.
- Antoniolli, A. F. *et al*, 2016. Avaliação técnica e econômica entre sistemas fotovoltaicos aplicados a edificações (BAPV) e sistemas idealmente instalados para máxima geração anual. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 6., 2016, Belo Horizonte. Anais... . Belo Horizonte: CBENS.
- ASHRAE Standard 55 – 2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta.
- BCB. Banco Central do Brasil. Calculadora do cidadão. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/corrigirPelaPoupanca.do?method=corrigirPelaPoupanca>>. Acesso em: 30 set. 2016.
- Didoné, E. L.; Wagner, A.; Pereira, F. O. R., 2014. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 3, n. 14, p.27-42.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2012. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro: EPE.
- Graham, J. R.; Harvey, C. R., 2001. The theory and practice of corporate finance: Evidence from the field. Journal Of Financial Economics. [s.i], p. 187-243..
- HOJI, M., 2012. Administração Financeira e Orçamentaria. 10. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A.
- IDEAL. Instituto para o Desenvolvimento de Energias Renováveis na América Latina, 2017. O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica. Florianópolis: IDEAL.
- LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2013. Manual de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados no Programa EnergyPlus - Versão 8.0. Florianópolis: LABEEE/UFSC.
- Montenegro, A. A., 2013. Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil. 2013. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Pereira, E. B. *et al.*, 2006. Atlas brasileiro de energia solar. São José do Campos (SP): Swera/Inpe [Solar And Wind Energy Resources Assessment/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais], 60 p.
- Rüther, R., 2004. Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial de Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas Interligadas à Rede Elétrica Pública no Brasil. Florianópolis: Ufsc/Labsolar.

- Santana, M. V., 2006. Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis-SC. 2006. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Santos, A. H. C. dos., 2015. Avaliação técnica e financeira da geração fotovoltaica integrada à fachada de edifícios de escritório corporativos na cidade de São Paulo. 2015. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SORGATO, Márcio José. A Influência do Comportamento do Usuário no Desempenho Térmico e Energético de Edificações Residenciais. 2015. 260 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

## **TECHNICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF THE APPLICATION OF THIN-FILM CADMIUM TELLURIDE (CDTE) PV MODULES ON OPAQUE FAÇADES OF OFFICE BUILDINGS**

**Abstract.** *This paper aims to evaluate the technical and economic feasibility of cadmium telluride (CdTe) photovoltaics (PV) modules on opaque façades of commercial building prototype located in Florianópolis-SC. This work was developed into two stages: technical analysis and economic analysis. The technical analysis sought to evaluate the energy performance of the building prototype adopted by means of computer simulation, analyzing the energy consumption of the building and the energy generation of PV systems installed on the roof and on the opaque façades. The economic analysis sought to evaluate the economic viability of the PV systems applied on the façades of the building, replacing traditional coating materials, in relation to a PV system applied on the roof of the same building. In order to do so, three typologies of the building prototype with different coating materials on the opaque facades were analyzed: (1) composite aluminum (ACM), (2) architectural glass and (3) CdTe PV modules. For each typology, three scenarios of tariff increase were considered: 1% per annum, 3% p.a., 5% p.a. Regarding the methods of investment feasibility, the indicators adopted were: Net Present Value (NPV), the Internal Rate of Return (IRR) and the discounted payback. The results showed that for the application of a PV system on opaque façades replacing conventional coating materials to become economically attractive in relation to a PV system applied on the roof (which meets all building's energy demand), it is necessary that the PV system of the facade meets more than 50% of the building's energy demand.*

**Key words:** *PV façades, Computer simulation, Technical and economic evaluation*