

THIAGO TOLEDO VIANA RODRIGUES, JOYCE CORRENA CARLO E DELLY OLIVEIRA FILHO

Influência de sistemas fotovoltaicos integrados a janelas no desempenho energético de edifícios de escritórios no Brasil

*Influence of photovoltaic systems integrated to windows in the energy
performance of office buildings in Brazil*

Thiago Toledo Viana Rodrigues

Possui graduação em arquitetura e urbanismo (2016), mestrado em arquitetura e urbanismo (2018) e é doutorando em Arquitetura e Urbanismo (início em 2019) pela Universidade Federal de Viçosa. Experiência em Eficiência Energética, com iniciação científica pelo Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética - Latecae.

Architect and Urbanist (2016), Master's degree in Architecture and Urbanism (2018) and Ph.D. student in Architecture and Urbanism since 2019 at the Federal University of Viçosa. Has experience in Energy Efficiency, with scientific initiation by the Laboratory of Technologies in Environmental Comfort and Energy Efficiency - Latecae.

thiagotvr15@hotmail.com

Joyce Correna Carlo

Possui graduação em arquitetura e urbanismo pela Universidade Federal de Minas Gerais (1997), especialização em Análise Urbana pela Universidade Federal de Minas Gerais (1999) e mestrado (2002) e doutorado (2008) em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina. Tem pós-doutorado pela Universidade Federal de Santa Catarina e é professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa.

Architect and Urbanist at the Federal University of Minas Gerais (1997), Specialist in Urban Analysis at the Federal University of Minas Gerais (1999), master's degree (2002) and Ph.D. (2008) in Civil Engineering at the Federal University of Santa Catarina. Post-doctorate at the Federal University of Santa Catarina and professor at the Department of Architecture and Urbanism at the Federal University of Viçosa.

joycecarlo@ufv.br

Delly Oliveira Filho

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1979), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1983), e doutorado em Electrical Engineering - McGill University (1995). Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal de Viçosa do Departamento de Engenharia Agrícola.

Electrical Engineer at the Federal University of Minas Gerais (1979), master's degree in Mechanical Engineering at the Federal University of Minas Gerais (1983), and Ph.D. in Electrical Engineering - McGill University (1995). Currently, works as a Full Professor at the Federal University of Viçosa in the Agricultural Engineering Department.

delly@ufv.br

Resumo

Sistemas fotovoltaicos integrados à construção (Building Integrated Photovoltaic - BIPV) podem formar parte de um edifício e substituir componentes da envoltória. Porém, sua utilização pode influenciar a demanda de energia. Em países tropicais como o Brasil, o aumento na temperatura interna pode contribuir no consumo de energia com sistemas de resfriamento, principalmente, durante os meses de verão. Este artigo tem como objetivo avaliar a influência de sistemas BIPV no desempenho energético de um edifício de escritórios, levando em consideração as propriedades térmicas deste tipo de tecnologia. O método incluiu simulações computacionais no EnergyPlus 8.4, onde foram propostos sistemas BIPV integrados às janelas. O mesmo edifício foi simulado para quatro cidades brasileiras, com variação de 3 latitudes e duas Zonas Bioclimáticas (ZB): Florianópolis-SC e Belo Horizonte-MG, ambos ZB3, e Vitória-ES e Fortaleza-CE, ZB8. A análise foi realizada por meio do balanço entre a geração fotovoltaica (FV) e a demanda de consumo de energia, comparando com um Caso Base sem sistema FV. Na ZB3, Florianópolis e Belo Horizonte, o uso de sistemas BIPV aumentou o consumo de energia com AVAC em cerca de 8% e 3%, respectivamente, enquanto na ZB8, Vitória e Fortaleza, foi encontrada uma redução no consumo de cerca de 1%.

Palavras-chave: Energia Solar. BIPV. Simulação Computacional. EnergyPlus.

Abstract

Building Integrated Photovoltaic (BIPV) can be part of a building and replace components of the envelope. However, its use can influence energy demand. In tropical countries like Brazil, the increase in interior temperature can contribute to energy consumption with cooling systems, especially during the summer period. This article aims to evaluate the influence of BIPV systems on the energy performance of an office building, taking into account the thermal properties of this type of technology. The method included computational simulations by EnergyPlus 8.4, in which we proposed BIPV systems integrated to the windows. The same building was simulated for four Brazilian cities, with a variation of 3 latitudes and two Bioclimatic Zones (ZB): Florianópolis-SC and Belo Horizonte-MG, in ZB3, and Vitória-ES and Fortaleza-CE, in ZB8. The analysis was carried out through the balance between photovoltaic (PV) generation and energy consumption demand, compared to a Base Case without PV system. In ZB3, Florianópolis and Belo Horizonte, the use of BIPV systems increased energy consumption with HVAC by 8% and 3%, respectively, while in ZB8, Vitória and Fortaleza, a reduction in consumption of about 1% was found.

Keywords: Solar Energy. BIPV. Computational Simulation. EnergyPlus.

Introdução

No Brasil, um país de grande extensão territorial, a utilização de sistemas fotovoltaicos (FV) conectados à rede auxilia na redução de perdas por distribuição, comuns à geração hidrelétrica, uma vez que a energia pode ser gerada no próprio local de consumo. Além disso, a geração FV pode minimizar os impactos sobre o meio ambiente, causados pela eliminação de poluentes advindos da queima de combustíveis fósseis em termoelétricas e do descarte inapropriado de resíduos de usinas nucleares, que dão suporte para atender ao aumento da demanda de energia no país (FERREIRA; SCOMPARIN; CARIGNANI, 2010).

Quando os sistemas FV estão localizados na própria edificação, eles podem ser instalados na envoltória de duas maneiras: adicionados/aplicados ao edifício (*Building Added/Attached Photovoltaic* - BAPV); e integrados ao edifício (*Building Integrated Photovoltaic* - BIPV). Os produtos BAPV requerem sistemas de montagem adicionais e são, normalmente, utilizados em retrofit. Por outro lado, os produtos BIPV, devido a sua área e seu peso reduzido, tornam-se parte integrante do edifício e podem substituir completamente componentes da envoltória, como: coberturas; revestimento de paredes; elementos de sombreamento; e, até mesmo, fechamentos transparentes como janelas e panos de vidro (DIDONÉ; WAGNER; PEREIRA, 2014). Desta forma, além da geração de energia, o sistema BIPV adquire função estrutural, de proteção solar e de revestimento e, assim, é possível reduzir os gastos de sua implementação por meio do método de custos substituídos¹.

Como exemplo, a substituição de um painel de vidro transparente por um vidro FV semitransparente (*Semi-Transparent Photovoltaic* - STPV) requer um investimento extra com um período de reembolso de 13 anos (CANNAVALE et al., 2017). No entanto, esse tempo pode baixar para 5 anos quando a janela a ser substituída é composta de vidros de elevado desempenho, que são mais onerosos que vidros comuns (CANNAVALE et al., 2017).

O uso de sistemas BIPV pode influenciar a demanda de energia para aquecimento, para resfriamento e para iluminação artificial, bem como o conforto térmico e visual dentro do edifício. As janelas STPV, por exemplo, podem ser usadas para reduzir os ganhos de calor solar e gerar eletricidade, enquanto continuam a fornecer iluminação natural adequada e vista para o exterior, além de influenciar a estética da edificação (KAPSIS; ATHIENITIS, 2015).

Em sistemas FV, apenas uma pequena parte da radiação solar incidente é convertida em energia elétrica (5 a 25% em sistemas comerciais), o restante é refletido ou absorvido como calor (TIWARI; MISHRA; SOLANKI, 2011). Além disso, os painéis FV produzem uma quantidade substancial de calor enquanto geram energia. Consequentemente, os sistemas BIPV tem uma influência significativa na quantidade de calor transferido da envoltória e podem afetar a temperatura do ar interior e o conforto dos ocupantes. Akata, Njomo e Mempo (2015) identificaram um aumento da temperatura do ar interior de cerca de 4°C para um edifício com sistema BIPV em Yaoundé, Camarões, tanto para o caso onde o sistema BIPV foi integrado ao telhado, quanto para o caso em que o sistema estava integrado às paredes de uma das fachadas.

O calor gerado/absorvido durante a conversão de energia solar em energia elétrica causa, também, o aumento da temperatura de funcionamento do módulo FV, que afeta tanto a corrente elétrica gerada quanto a sua tensão que, por sua vez, são diretamente relacionadas à eficiência do sistema FV (WANG et al., 2006). Assim, é necessário

¹ Neste método o valor do material de construção substituído pelo painel FV é descontado do custo do próprio painel. Tal artifício se aplica a edifícios em fase anterior à construção, etapa em que ainda não foram adquiridos ou instalados os materiais a serem substituídos (FERREIRA; SCOMPARIN; CARIGNANI, 2010).

precisão ao prever a temperatura do módulo FV, principalmente, em países tropicais como o Brasil onde a temperatura do painel atinge valores muito elevados (KANT et al., 2016).

Os dados de desempenho relatados pelos fabricantes são, normalmente, estabelecidos em condições padrão de ensaio (**Standart Test Conditions - STC²**) que podem não vir a ocorrer na prática, superestimando ou subestimando a geração de energia segundo o desempenho previsto (NG; MITHRARATNE; KUA, 2013). Olivieri et al. (2014) mostraram que os valores médios de eficiência de conversão dos sistemas STPV ao ar livre em Madri, Espanha, variam entre 2,1% e 3,2% em condições reais de operação. Estes valores se afastam das eficiências apresentadas pelos fabricantes nas STC que, geralmente, variam entre 5% e 9%, em sistemas disponíveis para comercialização.

Park et al. (2010) avaliaram os efeitos das características térmicas do módulo FV sobre o desempenho de geração elétrica. O experimento foi realizado nas STC e em condições externas. Os resultados mostraram que a potência diminuiu cerca de 0,48% (em STC, variando apenas a condição de temperatura) e 0,52% (em condições externas, abaixo de 500W/m²) para cada 1°C acima da temperatura de funcionamento normal do módulo FV.

Assim, para uma correta previsão da influência destes sistemas no desempenho energético de edifícios é necessário levar em conta a sua influência térmica nos ambientes internos e as perdas de eficiência devido às condições ambientais, principalmente, em países predominantemente tropicais como o Brasil, onde as temperaturas externas são elevadas e o acréscimo na temperatura interna pode gerar um aumento no consumo por sistemas de resfriamento.

Objetivo

Este artigo tem como objetivo avaliar a influência de sistemas BIPV no desempenho energético de um edifício de escritórios em diferentes latitudes brasileiras, ao considerar as propriedades térmicas deste tipo de sistema.

Trabalhos correlatos

Apesar das vantagens da geração FV, um dos grandes entraves para a sua popularização é o alto custo de implementação destes sistemas. Assim, alguns estudos buscam quantificar a influência no desempenho energético de edifícios que integrem este tipo de tecnologia, para verificar a viabilidade econômica de sua implementação³.

Dentre os trabalhos que abordam a integração de sistemas FV em fachadas, Cannavale et al. (2017) avaliaram o consumo global de energia para aquecimento, ar condicionado e iluminação artificial, em relação ao rendimento global de energia gerado por sistemas BIPV integrados a um edifício localizado em Bari, Itália. Os resultados mostraram que, em condições ideais (sem obstrução do entorno), economias acumuladas de até 18% poderiam ser obtidas. Do mesmo modo, Zhang et al. (2016) também chega-

² A norma ASTM E-1036 (1985) define os seguintes valores como condições padrão de ensaio (STC) para se obter a eficiência de um módulo fotovoltaico: 1000W/m² para irradiação; 25°C para temperatura do módulo; atmosfera média de 1.5 para espectro solar; 20°C para temperatura do ar externo; e velocidade do ar de 1m/s.

³ O incremento no grau de sustentabilidade ambiental alcançado através do emprego da geração FV não é representado nos custos da maioria dos estudos e, se fossem, seria irrisório o custo do sistema FV em comparação ao sistema convencional utilizado no Brasil (FERREIRA; SCOMPARIN; CARIGNANI, 2010).

ram a um percentual de 18% de economia no consumo de eletricidade para sistemas STPV integrados às janelas de um edifício localizado em Hong Kong.

Miyazaki, Akisawa e Kashiwagi (2005) encontraram uma economia de 55% no consumo de eletricidade ao utilizar uma janela STPV otimizada em um edifício de escritórios localizado em Tóquio, Japão. Para alcançar este percentual de economia, o estudo considerou a utilização de controles de iluminação e levou em conta condições ideais para o percentual de área envidraçada da fachada e para a transmitância do sistema STPV.

Kapsis, Dermardiros e Athienitis (2015) afirmam que, para um edifício em Toronto, Canadá, um módulo STPV com transmissão efetiva visível de 30% oferece luz diurna suficiente para o ambiente ao longo do ano.

Chae et al. (2014) avaliaram a influência de sistemas STPV no desempenho energético de um edifício para seis condições climáticas diferentes nos EUA e concluíram que as propriedades térmicas e óticas apropriadas às janelas STPV são diferentes para cada localidade. Em baixas e médias latitudes as janelas STPV podem economizar até 30% do consumo anual de energia com HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*).

Kapsis e Athienitis (2015) identificaram que, para um edifício comercial com sistemas BIPV localizado em Toronto, Canadá, os fatores que mais influenciaram o rendimento anual de eletricidade, os ganhos de calor solar e a disponibilidade luz do dia, foram a orientação da fachada e a porcentagem de área envidraçada.

Didoné e Wagner (2013) mostraram que o uso de janelas STPV pode economizar até 43% da eletricidade consumida em um edifício, apesar da pouca eficiência deste tipo de tecnologia (cerca de 3% em condições reais de operação), devido à grande disponibilidade de radiação solar que o Brasil apresenta. Esta economia pode ser alcançada por meio da geração de energia FV e da redução no consumo por sistemas HVAC, uma vez que a janela possui uma transmitância solar reduzida, diminuindo a carga de energia necessária para resfriamento. No entanto, esta redução na transmissão visível pode aumentar o consumo de energia com iluminação artificial, o que pode ser contornado pelo uso de sistema de controle de iluminação.

Ferreira, Scomparin e Carignani (2010) propuseram a substituição dos vidros de janelas de um edifício público na cidade de Cuiabá (Brasil) por um sistema FV interligado à rede com módulos semitransparentes e opacos. Os sistemas FV permitiram gerar, aproximadamente, 3,5% da energia consumida anualmente no edifício em estudo. A instalação dos módulos opacos representou um acréscimo de apenas 7,43% no custo de instalação em substituição a janelas de vidro laminado refletivo (embora essa seja uma condição teórica, pois elimina a transparência que proporciona vista e iluminação natural para o ambiente interno), enquanto o acréscimo foi de 182,38% com uso de módulos STPV.

Método

Este artigo tem como objetivo avaliar a influência de sistemas BIPV no desempenho energético de um edifício de escritórios em diferentes latitudes brasileiras, ao considerar as propriedades térmicas deste tipo de sistema. Foi simulado o desempenho energético de um edifício de escritórios com sistemas BIPV integrados às fachadas, e variando sua localização para cidades brasileiras em diferentes latitudes e zonas bioclimáticas. A análise foi realizada por meio do balanço entre a geração de energia FV e o consumo de energia com sistemas de HVAC, de iluminação artificial e de equipamentos, com a comparação entre um Caso Base (CB), sem sistema FV, e um Caso com sistema STPV.

As simulações foram realizadas para um ano completo, por meio do software *EnergyPlus*⁴, versão 8.4, com uso de arquivo climático Inmet para as cidades selecionadas (RORIZ, 2012). Destaca-se que os arquivos climáticos representam o clima da cidade e não o microclima da área de projeto, o que pode gerar diferenças nos resultados.

As localidades selecionadas foram Florianópolis-SC, Belo Horizonte-MG, Vitória-ES e Fortaleza-CE, representando cidades brasileiras com variações na disponibilidade de radiação solar, influenciadas pela latitude. Florianópolis é uma das cidades com maior nebulosidade do país, razão pela qual apresenta os menores índices de irradiação, com média anual dos totais diários de 4,24 kWh/m² [1]. No inverno, Florianópolis-SC pode apresentar temperaturas tão baixas quanto 5°C. Fortaleza foi selecionada por sua baixa latitude, pelo clima quente e por apresentar uma das maiores médias diárias de irradiação solar no país, 5,69 kWh/m² [1]. Apesar de estarem localizadas em latitudes muito próximas, Vitória e Belo Horizonte encontram-se em diferentes Zonas Bioclimáticas (ZB). Assim, a escolha buscou identificar o peso das características climáticas da localidade onde o sistema FV se encontra.

Cidade	ZB	Clima	Latitude	Temperatura média anual (°C)	Média anual dos totais diários de irradiação solar (kWh/m ²)	Altura solar às 12h do solstício de inverno (21/06)
Florianópolis	3	Subtropical	27°67'S	20	4,24	37,0°
Belo Horizonte	3	Subtropical úmido	19°55'S	21	4,35	46,3°
Vitória	8	Tropical	20°19'S	24	4,96	46,0°
Fortaleza	8	Tropical	3°78'S	25	5,69	62,4°

FIGURA 1 - Características das cidades simuladas

Fonte: CRESESB (2018)

Modelo Simulado

O modelo de estudo foi baseado em um levantamento entre os edifícios comerciais, de serviços e públicos etiquetados (ENCE PBE Edifica) no Brasil (INMETRO, 2017). A escolha por tipologias comerciais é devido à coincidência entre o pico de consumo de energia elétrica destes edifícios com os horários de maior insolação e, consequentemente, maior geração de energia por sistemas FV. Além disso, o perfil de edifícios etiquetados é compatível com a inserção de sistemas FV. Por ser uma tecnologia nova e ainda de alto custo, empreendimentos que já demonstram certa preocupação com o desempenho termo energético e com o uso de tecnologias mais sustentáveis estarão mais dispostos a inovar ao investir para que o setor se desenvolva (ALMEIDA, 2017).

O edifício X, localizado em Belo Horizonte, foi selecionado como referência para a criação do protótipo simulado, dentre outras construções etiquetadas. A edificação possui ENCE nível A na etapa de projeto, para envoltória e iluminação. A escolha levou em consideração a forma do edifício, o número de pavimentos e a grande área envidraçada presente em sua fachada [2] que é compatível com a concepção de um edifício

⁴ O EnergyPlus possibilita análises de cargas térmicas e consumo de energia em sistemas de aquecimento e resfriamento, de ventilação e de iluminação das edificações, levando em consideração ainda, as cargas internas e as propriedades dos materiais e de outros elementos que participam das trocas térmicas, sendo integrados numa avaliação interativa (CARLO, 2008).

BIPV, com grande potencial para a geração de energia solar, principalmente por sistemas STPV. O edifício apresenta as maiores áreas de fachada voltadas para Norte e Sul.

A edificação de atividade corporativa apresenta uma área de 9.600m² divididos em 18 pavimentos, que podem ser desmembrados em uma base e uma torre de escritórios [2]. Na base estão localizadas garagens, entradas e uma área de convívio, com salas multiuso em pilotis.

A torre de escritórios é destinada a salas comerciais, e está subdividida em dois grupos de pavimentos tipo com dimensões diferentes: os pavimentos inferiores, com cerca de 410m²; e os pavimentos superiores de planta livre, com cerca de 385m².

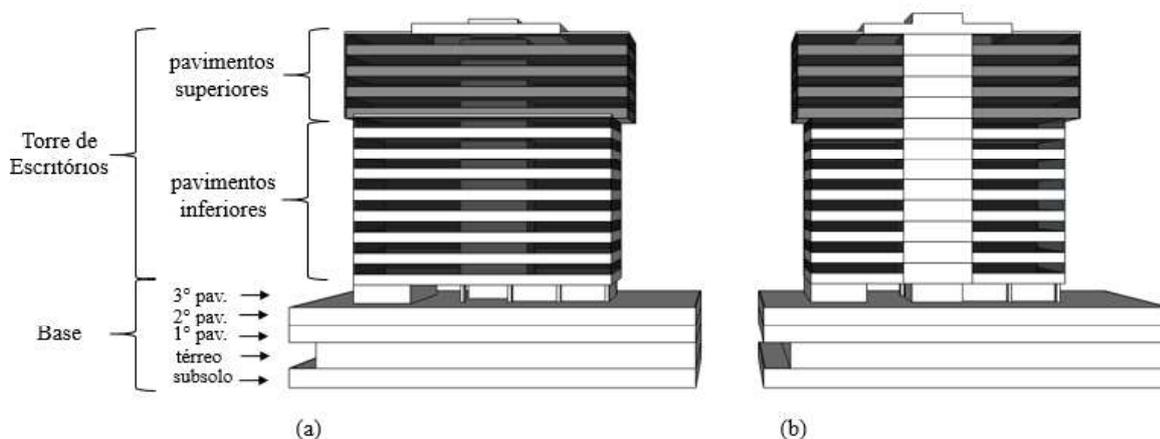


FIGURA 2 - (a) Perspectiva da fachada norte e (b) perspectiva da fachada sul do edifício X

Fonte: Os autores (2018)

A planta tipo dos pavimentos inferiores se repete do quarto ao décimo primeiro pavimento, com proposta de ocupação elaborada pelos projetistas via layout, que para as simulações é representada por 9 zonas térmicas [3].

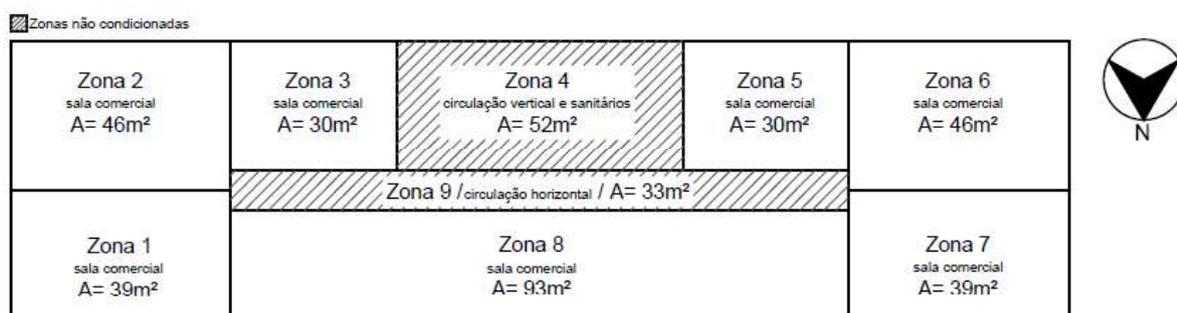


FIGURA 3 - Zoneamento térmico dos pavimentos inferiores

Fonte: Os autores (2018)

A planta tipo dos pavimentos superiores se repete do décimo segundo ao décimo quinto pavimento, e está dividida em duas grandes salas com planta livre, representada por 3 zonas térmicas [4].

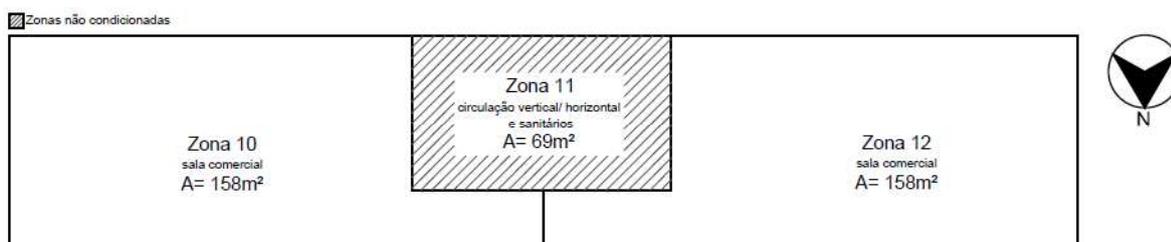


FIGURA 4 - Zoneamento térmico dos pavimentos superiores

Fonte: Os autores (2018)

A cobertura possui cômodos destinados à caixa d'água e à sala de máquinas, o restante são terraços, o que levou o fechamento superior do décimo quinto pavimento ser configurado conforme a Figura 5.

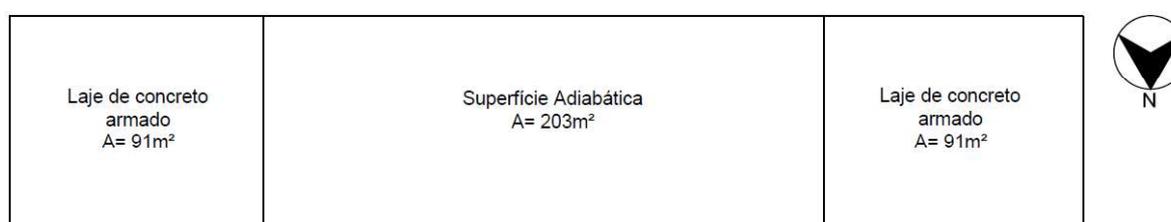


FIGURA 5 - Teto das zonas do décimo quinto pavimento

Fonte: Os autores (2018)

As simulações foram realizadas apenas para a torre de escritórios, pois são onde se concentram os ambientes de permanência prolongada. Desta forma, foram simulados 3 pisos de cada grupo de pavimentos (superiores e inferiores), que apresentam condições distintas: os dois extremos e um intermediário [6], com uso de multiplicadores para os demais (método usual em simulações por meio do *EnergyPlus*) e sem a base⁵. O sombreamento do entorno foi desconsiderado.

Apesar da base não ter sido simulada, a altura dos pavimentos foi configurada conforme a realidade devido à ação dos ventos. Assim, iniciou-se a modelagem da torre de escritórios pelo quarto pavimento com sua distância real até o solo configurada no programa [6].

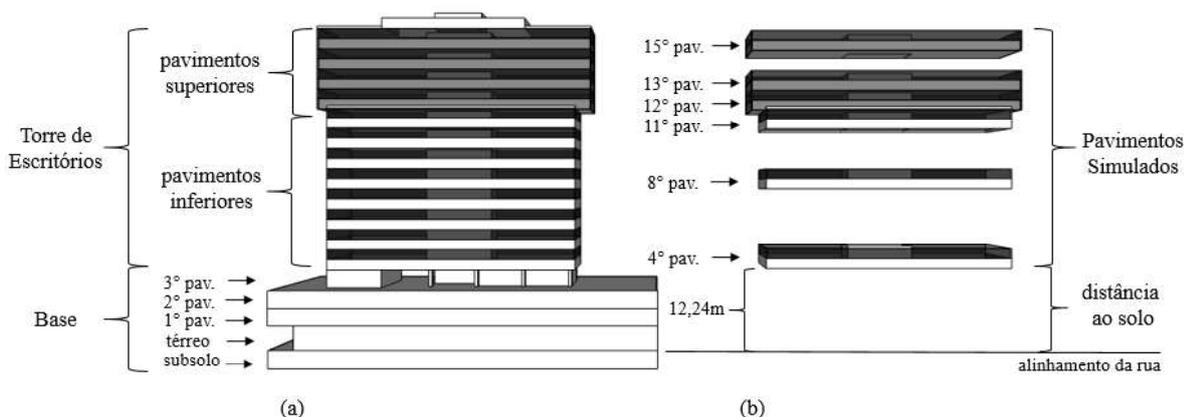


FIGURA 6 - (a) Perspectiva da fachada norte e (b) pavimentos simulados do edifício X

Fonte: Os autores (2018)

⁵ De acordo com Hachem, Athienitis e Fazio (2014) a aplicação de sistemas FV nos três primeiros pavimentos de edificações localizadas em grandes centros urbanos deve ser evitada (mediante avaliação prévia), pois, estes pavimentos apresentam alto índice de sombreamento pelo entorno e baixa disponibilidade de radiação solar direta. Esse fato deve ser levado em conta, principalmente, quando se trata de janelas com sistema STPV, os quais podem ser substituídas por janelas com vidros claros, para aproveitar a pouca luz natural disponível.

Para as paredes internas, divisórias de gesso foram especificadas segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005) Para as paredes externas e para a laje, as tipologias de parede n°36 e de cobertura n°1, respectivamente, do Anexo Geral V da Portaria de n° 50/2013 do Inmetro (INSTITUTO..., 2013) foram adotadas. Para a caixa de elevadores e circulação vertical paredes de concreto [7] foram configuradas. Os materiais utilizados atendem aos requisitos de nível A para ZB3 e ZB8 do RTQ-C (INSTITUTO..., 2010).

Componentes	Materiais	Espessura (cm)	Transmitância [W/(m²K)]	Capacidade térmica [kJ/m²K]	Absortância solar
Paredes Internas	Gesso	1,25	2,66	26,00	0,20
	Câmara de ar	> 5,00			
	Gesso	1,25			
Paredes Externas	Placa Cimentícia	1,00	0,90	29,00	0,40
	Lã de Rocha	4,00			
	Gesso	1,25			
Paredes Circulação Vertical	Concreto	10,00	4,40	240,00	0,50
Laje	Concreto	10,00	3,73	220,00	0,50

FIGURA 7 - Especificação dos materiais construtivos utilizados

Fonte: Anexo Geral V - Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros da Portaria de n° 50/2013 do Inmetro (INSTITUTO..., 2013)

A tipologia de edifício empresarial de escritórios apresenta ambientes condicionados artificialmente, com um sistema central composto de resfriador de líquido a água por torre de resfriamento e *fan-coils* para distribuição do ar. O sistema tem auto dimensionamento pelo arquivo climático e temperatura de *setpoint* de resfriamento de 26°C e de aquecimento de 18°C. As horas não atendidas pelo sistema foram utilizadas como indicador de controle das condições de conforto térmico.

O sistema de esquadria com material *STPV* integrado tende a ser fixo, assim, a ventilação natural não foi considerada nas simulações. Adotou-se uma taxa de infiltração de 0,5 trocas de ar por hora nos ambientes simulados, usado para ambientes condicionados artificialmente e sem ventilação natural (BAVARESCO; GHISI, 2017).

Por ser um edifício de escritórios, os horários de ocupação foram definidos entre 8h e 18h, com horário de intervalo das 12h às 14h, com exceção dos finais de semana, quando o edifício não é ocupado. A ocupação foi de 14,7m²/pessoa, conforme definido por Santana (2006) para edifícios de escritórios, a iluminação foi especificada para atender aos limites de densidade de potência para nível A estabelecidos pelo RTQ-C (INSTITUTO..., 2010) e a carga de equipamentos foi definida conforme Carlo (2008), mostrados na Figura 8.

	Cargas internas (W/m²)	Referência
Equipamentos	9,6	(CARLO, 2008)
Iluminação	9,7	Nível A RTQ-C (INSTITUTO..., 2010)
Ocupação	8,84	(SANTANA, 2006)

FIGURA 8 - Cargas térmicas adotadas nos modelos simulados

Fonte: Os autores (2018)

Após obtidos os consumos dos casos base para cada cidade, eles foram comparados a benchmarkings de energia de edifícios corporativos por meio da plataforma de cálculo do Centro Brasileiro de Construção Sustentável, cuja validação é baseada em Borgstein e Lamberts (2014).

Modelo Fotovoltaico

O edifício selecionado apresenta janelas em fita que ocupam aproximadamente 50% da área da fachada, assim, foram propostos sistemas STPV integrados às janelas.

A simulação dos sistemas FV teve duas abordagens: uma elétrica e outra térmica. Como o *EnergyPlus* não considera os materiais do painel FV nos cálculos térmicos do ambiente simulado (RODRIGUES; CARLO, 2017), foram utilizados painéis de sombreamento (categoria *shade*) para a simulação térmica dos sistemas STPV. Assume-se que cada sistema de abertura possui um painel de sombreamento configurado com as propriedades térmicas do material FV, *A-SI Thru PV* 2mm [9], cuja modelagem foi conforme a Figura 10 (RODRIGUES; CARLO; OLIVEIRA FILHO, 2018). O modelo FV elétrico para o cálculo da geração de energia foi locado na superfície externa do vidro mais externo.

A esquadria com sistema STPV é composta por uma folha de vidro externa (*Clear* 6mm), uma folha de vidro interna (*Clear* 3mm), um shade intermediário (*A-SI Thru PV* 2mm), envolto em duas camadas de ar adjacentes, cada qual com 6mm de espessura [10].

Para a simulação do CB foi adotado um vidro de alto desempenho composto por uma única folha de vidro com espessura de 8mm, o vidro de nº31 chamado *Reflecta* Cinza do Anexo Geral V do RAC (INSTITUTO..., 2013).

Propriedades térmicas	<i>Reflecta</i> Cinza 8mm	<i>Clear</i> 6mm	<i>Clear</i> 3mm	<i>A-SI Thru PV</i> 2mm
Transmitância solar	0,240	0,775	0,837	0,080
Refletância solar	0,170	0,071	0,075	0,125
Absortância Solar	0,590	0,154	0,088	0,795
Emissividade anterior	0,840	0,840	0,840	0,900
Emissividade posterior	0,840	0,840	0,840	0,900
Condutividade térmica (W/mK)	0,900	0,900	0,900	0,190

FIGURA 9 - Propriedades térmicas e óticas dos vidros e do sistema STPV utilizados nas simulações

Fonte: Baseada em Didoné e Wagner (2013) e *EnergyPlus* (2016).

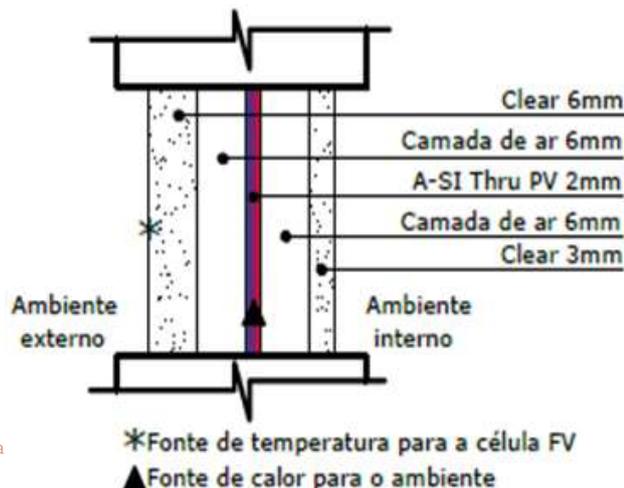


FIGURA 10 - Modelo de esquadria adotado

Fonte: Rodrigues, Carlo e Oliveira Filho (2018)

As características elétricas do sistema FV foram obtidas por meio do *software PVsyst* (PVSYST, 2017), que permite ao usuário analisar diferentes configurações de modelos FV para identificar a melhor solução possível. O *software* conta com uma base de dados onde é possível obter as propriedades elétricas de centenas de sistemas FV catalogados. O modelo escolhido para os sistemas STPV foi o ASI THRU-1-IO 10%, um painel FV semitransparente de silício amorfo do fabricante *Schott Solar AG*, com eficiência de 5,04% para as condições de teste padrão (*Standart Test Conditions- STC*).

Foi adotado o modelo *Simple* no cálculo da geração de energia FV, que utiliza uma eficiência fixa inserida de acordo com as especificações do fabricante nas STC.

Resultados e discussões

Análise do Desempenho Energético

A Figura 11 apresenta o consumo por usos finais pelos sistemas de iluminação, de equipamentos e de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) do Caso Base (CB) que, como esperado, variou de acordo com cada cidade: 64 kWh/m² para Florianópolis, 68 kWh/m² para Belo Horizonte, 84 kWh/m² para Vitória e 92 kWh/m² para Fortaleza. A principal diferença foi decorrente do consumo por resfriamento. Enquanto em Florianópolis ele foi de 16 kWh/m², ou 25,5% do consumo total da torre de escritórios, em Fortaleza o consumo por resfriamento foi de 40 kWh/m², que corresponde a 44,1% do consumo da torre.

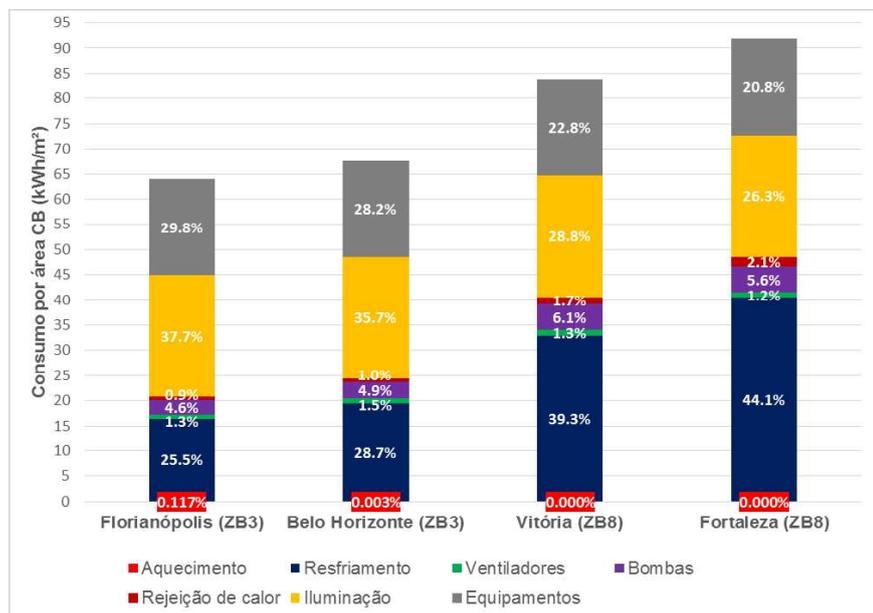
As horas de resfriamento não atendidas pelo sistema, no CB, foram de: 82,50h para Florianópolis, 68,50h para Belo Horizonte, 170,25h para Vitória e 308,25h para Fortaleza. Este último ultrapassou o limite de 300 horas/ano exigidas pela Standard 90.1 (ASHRAE, 2013), porém, optou-se por manter o auto dimensionamento em todos os casos para fins de comparação, visto que somente nesta cidade o sistema de condicionamento não atendeu ao limite prescrito pela norma internacional.

Não houve consumo por aquecimento em Vitória e Fortaleza por estarem localizadas na ZB8. Florianópolis e Belo Horizonte apresentam temperaturas mais amenas e este consumo foi registrado, principalmente durante os meses de inverno. Entretanto, o aquecimento participa com uma porcentagem mínima em relação ao consumo total da torre de escritórios, 0,117% e 0,003%, respectivamente [11].

O consumo por iluminação e equipamentos foi o mesmo em todos os casos, pois as suas cargas e padrões de uso não foram variados por cidade.

FIGURA 11 - Usos finais do consumo anual de energia do Caso Base para cada cidade

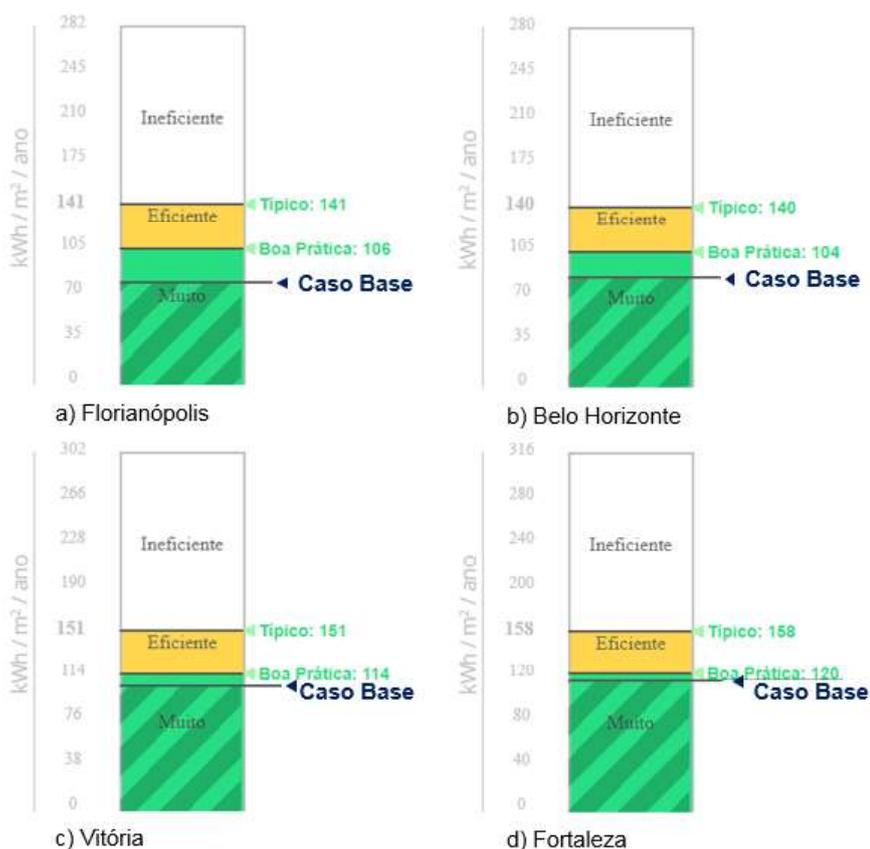
Fonte: Os autores (2018)



Também foi realizada a avaliação comparativa (*benchmarking*) do consumo anual do Caso Base para as 4 cidades e os gráficos da Figura 12 indicam o nível de eficiência atingido pelo protótipo simulado em comparação a edifícios semelhantes no mercado brasileiro, neste caso, edifícios corporativos. O protótipo simulado ficou classificado como muito eficiente para todas as localidades, mostrando que a tipologia escolhida e os materiais especificados foram compatíveis com o clima das cidades simuladas.

FIGURA 12 - Benchmarking do consumo anual do Caso Base para as 4 cidades: (a) Florianópolis; (b) Belo Horizonte; (c) Vitória; (d) Fortaleza.

Fonte: CBCS (2016), modificado pelos autores.



Influência do BIPV

Florianópolis

Em Florianópolis, o consumo do sistema de AVAC que mais variou do Caso FV em comparação ao CB, foi o consumo por resfriamento [13], que aumentou 7230,65 kWh (9,19% de aumento). Embora o consumo por aquecimento no Caso FV tenha apresentado uma redução de 65,74% em comparação ao CB, ele representa uma parcela pequena do consumo total da torre de escritórios, de apenas 236,47 kWh. As horas de resfriamento não atendidas pelo sistema, no Caso FV, foram de 104h.

Em Florianópolis, a utilização do sistema STPV gerou um aumento de 8,19% no consumo total de energia por AVAC e o consumo total da torre de escritórios se elevou em 2,66% devido aos efeitos térmicos.

	CASO BASE (kWh)	CASO FV (kWh)	FV – CB* (kWh)	(FV – CB)/CB* (%)
Aquecimento	359,7	123,23	-236,47	-65,74
Resfriamento	78681,33	85911,98	7230,65	9,19
Ventiladores	3929,24	3898,47	-30,77	-0,78
Bombas	14136,92	15136,4	999,48	7,07
Rejeição de calor	2815,5	3033,83	218,33	7,75
Consumo total com AVAC	99922,69	108103,91	8181,22	8,19
Iluminação	116261,2	116261,2	0	0
Equipamentos	91881	91881	0	0
Consumo total da Torre	308064,89	316246,11	8181,22	2,66

*Valores positivos representam aumento no consumo de energia e valores negativos economia.

FIGURA 13 - Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Florianópolis

Fonte: Os autores (2018)

Belo Horizonte

Belo Horizonte apresentou desempenho semelhante a Florianópolis por estarem na mesma ZB. Houve um aumento de 4,13% no consumo por resfriamento (3869,47 kWh) e uma redução de 85,45% no consumo por aquecimento (porém apenas 8,75 kWh) do Caso FV em comparação ao CB [14]. A utilização do sistema STPV gerou uma carga térmica que aumentou em 3,25% o consumo total por AVAC e em 1,17% o consumo da torre. As horas de resfriamento não atendidas pelo sistema, no Caso FV, foram de 104,5h.

	CASO BASE (kWh)	CASO FV (kWh)	FV – CB* (kWh)	(FV – CB)/CB* (%)
Aquecimento	10,24	1,49	-8,75	-85,45
Resfriamento	93593,01	97462,48	3869,47	4,13
Ventiladores	4856,13	4620,18	-235,95	-4,86
Bombas	16010,98	16062,61	51,63	0,32
Rejeição de calor	3152,27	3294,37	142,1	4,51
Consumo total com AVAC	117622,63	121441,13	3818,5	3,25
Iluminação	116261,2	116261,2	0	0
Equipamentos	91881	91881	0	0
Consumo total da Torre	325764,83	329583,33	3818,5	1,17

*Valores positivos representam aumento no consumo de energia e valores negativos economia.

FIGURA 14 - Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Belo Horizonte

Fonte: Os autores (2018)

Vitória

Em Vitória, com a utilização do sistema STPV, houve uma redução no consumo de energia em todos os componentes ativos do sistema de AVAC [15], visto que o consumo por aquecimento se manteve inexistente, assim como no CB. A maior redução foi no consumo para resfriamento, de 794,93 kWh (0,50% em relação ao CB). Assim, o Caso FV proporcionou uma economia de 0,87% no consumo total por AVAC e 0,42% no consumo total da torre. As horas de resfriamento não atendidas pelo sistema, no Caso FV, foram de 189,25h.

	CASO BASE (kWh)	CASO FV (kWh)	FV – CB* (kWh)	(FV – CB)/CB* (%)
Aquecimento	0	0	0	0
Resfriamento	158657,24	157862,31	-794,93	-0,5
Ventiladores	5395,55	5121,05	-274,5	-5,09
Bombas	24668,4	24085,88	-582,52	-2,36
Rejeição de calor	6859,81	6809,71	-50,1	-0,73
Consumo total com AVAC	195581	193878,95	-1702,05	-0,87
Iluminação	116261,2	116261,2	0	0
Equipamentos	91881	91881	0	0
Consumo total da Torre	403723,2	402021,15	-1702,05	-0,42

*Valores positivos representam aumento no consumo de energia e valores negativos economia.

FIGURA 15 - Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Vitória

Fonte: Os autores (2018)

Fortaleza

O Caso FV em Fortaleza, assim como em Vitória, também contribuiu para que houvesse uma redução no consumo de energia comparado ao CB. O consumo para resfriamento também representou a maior economia [16], diminuiu 1240,42 kWh (0,64% em relação ao CB). Assim, houve uma economia de 0,94% no consumo total por AVAC e de 0,50% no consumo da torre.

Em Fortaleza, as horas de resfriamento não atendidas pelo sistema, no Caso FV, foram de 321,25h, o que ultrapassou o limite de 300 horas da Standard 90.1 (ASHRAE, 2013). No entanto, assim como no caso base, o auto dimensionamento do ar condicionado foi mantido, pois o objetivo da análise foi manter as mesmas condições de cálculo para todos os Casos.

	CASO BASE (kWh)	CASO FV (kWh)	FV – CB* (kWh)	(FV – CB)/CB* (%)
Aquecimento	0	0	0	0
Resfriamento	194833,59	193593,17	-1240,42	-0,64
Ventiladores	5177,97	4995,12	-182,85	-3,53
Bombas	24654,7	23941,15	-713,55	-2,89
Rejeição de calor	9414,18	9345,73	-68,45	-0,73
Consumo total com AVAC	234080,44	231875,17	-2205,27	-0,94
Iluminação	116261,2	116261,2	0	0
Equipamentos	91881	91881	0	0
Consumo total da Torre	442222,64	440017,37	-2205,27	-0,5

*Valores positivos representam aumento no consumo de energia e valores negativos economia.

FIGURA 16 - Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Fortaleza

Fonte: Os autores (2018)

Foi possível perceber que a influência que o sistema STPV pode apresentar no consumo de energia com sistemas de AVAC está diretamente relacionada ao clima onde o edifício se localiza e pode significar aumento ou diminuição no consumo de acordo com a zona bioclimática.

Para a ZB8 (Vitória e Fortaleza), o Caso FV apresentou um consumo de energia menor se comparado ao CB, enquanto o Caso FV apresentou aumento no consumo por AVAC na ZB3 (Florianópolis e Belo Horizonte).

O uso do sistema STPV trouxe uma redução da radiação solar transmitida pelas janelas de cerca de 20% em todas as cidades [17], devido à transmitância solar reduzida do material FV (8%), mesmo em comparação ao vidro de alto desempenho utilizado no Caso Base (24%).

Apesar da redução na transmitância solar, o sistema de esquadrias STPV é composto por vidros duplos, enquanto no CB foi utilizado uma única folha de vidro, cujas transmitâncias térmicas foram 2,18 e 5,71 W/m²K respectivamente. O vidro duplo possui a propriedade de reduzir as trocas térmicas por condução com o meio externo.

Para Florianópolis, que apresenta temperaturas mais amenas, o vidro único facilita as perdas de calor para o ambiente externo em relação ao duplo, principalmente durante o inverno e no período da noite, devido à amplitude térmica diária, o que resfria naturalmente o edifício e reduz a sua carga térmica. Durante o mês de julho, mês mais frio para Florianópolis, o uso do vidro único fez com que as perdas pelas janelas (251W) fossem maiores do que os ganhos (240W), enquanto no Caso FV o vidro duplo fez com que a situação se invertesse [17], deixando as perdas (151W) menores do que os ganhos (194W). Apesar do clima mais ameno, o maior consumo para Florianópolis ainda é por resfriamento. Portanto, o uso de vidros duplos no Caso FV e consequente diminuição nas perdas de calor contribuíram para o aumento no consumo de AVAC.

Em Fortaleza, pelas suas temperaturas elevadas durante todos os meses do ano, o isolamento proporcionado pelo vidro duplo não prejudica o saldo entre ganhos e perdas, pois os ganhos são muito maiores que as perdas. Em junho, mês menos quente, as perdas do CB são de 203W e os ganhos são de 563W. Com o uso do vidro duplo no Caso FV, tanto perdas quanto ganhos diminuem, passando para 107W e 437W, respectivamente [17]. Como o vidro duplo não modificou a proporção entre ganhos e perdas térmicas, a redução na radiação solar transmitida pelas janelas no Caso FV em Fortaleza teve peso maior do que em Florianópolis, o que também ocorreu devido à maior disponibilidade de radiação na primeira cidade.

Ainda em Fortaleza, a soma de ganhos por radiação do mês mais frio e do mês mais quente no ambiente do CB foi de 543W e em Florianópolis foi de 418W [17]. Portanto, o aumento do isolamento das janelas duplas e redução da transmissão solar com o STPV do caso FV em Fortaleza isolou o edifício de maiores ganhos térmicos e, portanto, ele apresentou consumo menor que o CB.

FIGURA 17 - Ganhos e perdas pelas janelas da Zona 7/ pavimento 8 para o mês mais frio e mais quente de Florianópolis e Fortaleza

Fonte: Os autores (2018)

Período*	Radiação solar transmitida pelas janelas [W]		Ganho de calor da zona pelas janelas [W]		Perda de calor da zona pelas janelas [W]	
	Julho	Janeiro	Julho	Janeiro	Julho	Janeiro
Florianópolis CB	167,81	250,32	240,55	403,64	251,43	210,84
Florianópolis FV	34,15	50,54	194,46	333,08	151,36	114,63
Período*	Junho	Dezembro	Junho	Dezembro	Junho	Dezembro
Fortaleza CB	306,21	237,1	563,44	427,91	203,01	150,92
Fortaleza FV	61,89	48,06	437,51	343,8	107,31	80,06

* Os meses escolhidos representam os meses mais quentes e mais frios para cada cidade.

Energia Radiante

Além da influência do material STPV no consumo dos sistemas de AVAC, este pode influenciar também as variáveis relacionadas ao conforto do ambiente interno, como a temperatura radiante emitida pelo vidro a que os usuários podem estar submetidos, independente da temperatura do ar.

As temperaturas radiantes anuais, mínimas e máximas, tiveram variações tanto entre o Caso Base e o Caso FV, quanto entre as cidades simuladas [18]. Os dados representam as temperaturas radiantes médias no ambiente, obtidas para a zona 7 do pavimento 8, no período de 8h às 18h. As maiores diferenças foram observadas entre as temperaturas mínimas, onde Florianópolis registrou 15,58°C no Caso Base e 17,09°C no Caso FV, enquanto Fortaleza apresentou mínimas de 25,22°C no Caso Base e 26,23°C no Caso FV. Portanto, qualquer acréscimo na temperatura do ambiente interno de Fortaleza já pode significar um aumento no desconforto do usuário, visto que a cidade apresenta temperaturas mais elevadas durante todo o ano.

FIGURA 18 - Temperaturas radiantes mínimas e máximas anuais do Caso Base e do Caso FV na Zona 7 do pavimento 8 de 8h às 18h

Fonte: Os autores (2018)

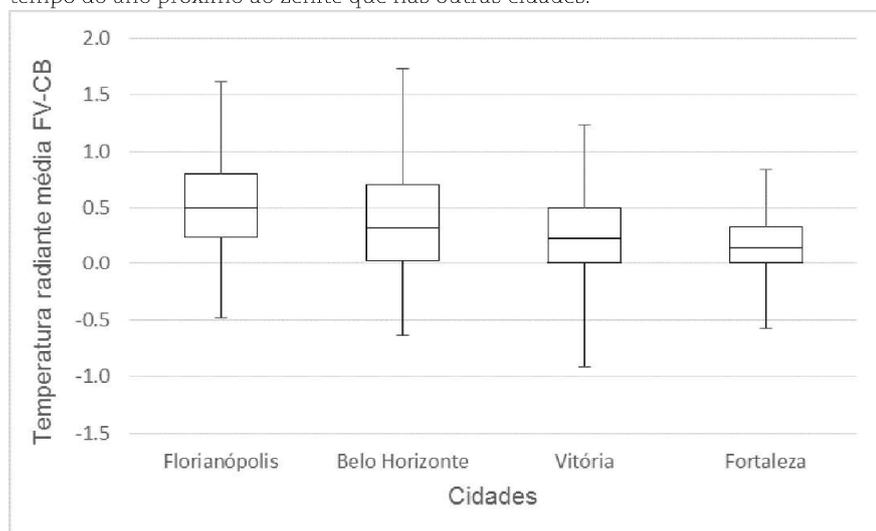
Cidade	Temperatura radiante mínima (°C)		Temperatura radiante máxima (°C)	
	CB	FV	CB	FV
Florianópolis	15,58	17,09	33,71	33,67
Belo Horizonte	19,01	20,82	34,88	34,44
Vitória	22,14	23,44	37,11	36,42
Fortaleza	25,22	26,23	34,94	34,71

Ao avaliar as condições de radiação térmica na Zona 7 do pavimento 8, mais de 50% das diferenças de temperatura radiante média entre o Caso FV e o CB foram positivos [19]. Isto evidencia que, durante o período de ocupação (8h às 18h), os usuários dos casos com sistema FV podem estar submetidos a condições de conforto mais prejudiciais, mesmo que a diferença na temperatura radiante tenha se mantido abaixo de 2°C.

Entre as cidades avaliadas houve, novamente, uma diferença conforme o zoneamento bioclimático. A ZB3 apresentou diferenças maiores entre o Caso FV e o CB. Florianópolis, por exemplo, teve cerca de 25% das temperaturas acima de 0,5°C. Nas cidades da ZB8, por outro lado, mais de 50% das diferenças foram menores que 0,5°C. Fortaleza apresentou as menores diferenças, o que pode ser explicado devido à sua baixa latitude, pois a instalação dos sistemas STPV é vertical (nas janelas) e o sol permanece mais tempo do ano próximo ao zênite que nas outras cidades.

FIGURA 19 - Diferença entre a média no ambiente da temperatura radiante horária do Caso FV e do Caso Base na Zona 7 do pavimento 8 de 8h às 18h para o período de um ano

Fonte: Os autores (2018)



Geração de Energia

Apesar da geração de energia FV ter sido estimada segundo uma eficiência fixa (5,04%, fornecida pelo fabricante nas STC), ela foi adotada como uma referência para estimar a contribuição dos sistemas FV no balanço energético do edifício para cada localidade. Porém, é importante destacar que a quantidade de energia gerada irá variar segundo a temperatura dos painéis FV e as condições locais (temperatura externa, disponibilidade de radiação, velocidade do ar, entre outras) que influenciam a eficiência da célula FV (RODRIGUES; CARLO; OLIVEIRA FILHO, 2018).

Como foi utilizada a mesma eficiência para todos os casos, a geração FV reflete a intensidade da radiação na fachada para cada cidade e a maior quantidade de horas com disponibilidade de radiação acima da necessária para que o software considere o sistema em funcionamento (0,3W).

A geração de energia variou entre 15,2% e 30,6% do consumo do AVAC, ou 7,92% a 11,28% do consumo da torre, para Fortaleza e Belo Horizonte, respectivamente [20]. As maiores proporções entre geração e consumo foram nas cidades da ZB3, cujo consumo do sistema AVAC aumentou entre 3% e 8% com a instalação do sistema fotovoltaico, enquanto as menores proporções foram na ZB8, cujo consumo do sistema AVAC se reduziu em até de 0,94% com o sistema fotovoltaico.

Belo Horizonte é a cidade em que o edifício apresentou melhor balanço de energia: a geração FV representa uma parcela de 11,28% do consumo total da torre de escritórios, e o sistema FV proporcionou um aumento de 1,17% no consumo comparado ao CB. Assim, mesmo descontando o aumento no consumo, o saldo final é positivo, cerca de 10% do total consumido na torre.

	Geração FV (kWh)	Geração FV/ consumo total com AVAC (Caso FV) (%)	Diferença no consumo de energia por AVAC (FV-CB)/ CB* (%)	Geração FV/ consumo total da Torre (Caso FV) (%)	Diferença no consumo de energia total da Torre (FV- CB)/CB* (%)	Saldo de Energia total da torre (%)
Florianópolis	30910,88	28,59	8,19	9,77	2,66	7,11
Belo Horizonte	37165,23	30,6	3,25	11,28	1,17	10,11
Vitória	35349,15	18,23	-0,87	8,79	-0,42	9,21
Fortaleza	34835,14	15,02	-0,94	7,92	-0,5	8,42

* Valores positivos representam aumento no consumo de energia e valores negativos economia

FIGURA 20 - Comparação da energia FV gerada com a energia elétrica consumida para um ano

Fonte: Os autores (2018)

Considerações Finais

A principal influência do sistema STPV no consumo de energia do edifício simulado foi referente às cargas de resfriamento e variou para cada zona bioclimática. Na ZB3, Florianópolis e Belo Horizonte, o uso de sistemas STPV aumentou o consumo de energia com AVAC em cerca de 8% e 3%, respectivamente, enquanto na ZB8, Vitória e Fortaleza, o sistema STPV reduziu este consumo em cerca de 1%, porém, com a participação do sistema construtivo de aberturas ao qual o fotovoltaico deve ser instalado.

A influência ocorreu tanto pela transmitância solar do material FV, que reduziu a radiação transmitida pelas janelas em cerca de 20%, quanto pela transmitância térmica

do vidro duplo no sistema STPV, que alterou a dinâmica das trocas de calor com o meio exterior. O vidro duplo colaborou com o aumento do consumo por resfriamento na ZB3, pois reduziu as perdas térmicas proporcionadas pelo vidro de folha única do Caso Base no período mais frio do ano. Já na ZB8, essas perdas não eram significativas pela ausência de estação fria e o vidro duplo não alterou a dinâmica das trocas térmicas do edifício. Nestas localidades, houve ligeira redução do consumo de AVAC com a instalação do sistema fotovoltaico sobre o vidro duplo, cerca de 1%.

Além disso, os Casos FV apresentaram aumento na temperatura radiante do ambiente interno durante o período de ocupação (8h às 18h). No entanto, este aumento se manteve abaixo de 2°C em todas as cidades, e foi mais significativo em locais de alta latitude.

Com relação à geração de energia, nas cidades da ZB3, após descontado o gasto extra no consumo com AVAC, a energia gerada representou cerca de 7% e 10% do consumo total da torre de escritórios, enquanto na ZB8, a geração FV mais a energia economizada com AVAC representou cerca de 9% e 8% deste consumo. Deve-se destacar, no entanto, que foi utilizada uma eficiência fixa para o sistema FV e, portanto, as condições climáticas que alteram a temperatura superficial do STPV e sua provável eficiência não foram analisadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte da Capes, da Fapemig e da Cemig-D/Aneel.

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

AKATA, M. A. E.; NJOMO, D.; MEMPOUO, B. The effect of building integrated photovoltaic system (Bipvs) on indoor air temperatures and humidity (Iath) in the tropical region of Cameroon. **Future Cities and Environment**, ago. 2015. DOI:<https://doi.org/10.1186/s40984-015-0002-y>

ALMEIDA, P.C. Influência da Instalação de Sistemas Fotovoltaicos no Valor de Edificações. Viçosa, 2017. **Dissertação** (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, abril de 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa Nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

ANDRADE, A. C. Análise e simulação da distribuição de temperaturas em módulos fotovoltaicos. Porto Alegre, 2008. **Tese** (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. **ASHRAE Standard 90.1-2013**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2013.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E-1036**: Standard Methods of Testing Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells. USA, 1985.

BAVARESCO, M. V.; GHISI, E. Influência da Interação dos Usuários com Elementos Internos de Sombreamento no Consumo Energético de Edificações Comerciais. XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. **Anais ...** Balneário Camboriú, SC, Set. 2017.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 82-91, oct. 2014. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.028>

CANNAVALE, A.; IERARDI, L.; HÖRANTNER, M.; EPERON, G. E.; SNAITH, H. J.; AYR, U.; MARTELOTTA, F. Improving energy and visual performance in offices using building integrated perovskite-based solar cells: A case study in Southern Italy. **Applied Energy**, v. 205, p. 834-846, aug. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.112>

CARLO, J. C. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética da Envolória de Edificações Não Residenciais. Florianópolis, 2008. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. Plataforma de Cálculo de Benchmarking Energético de Edificações. **CBCS**, 2016. Disponível em: <<http://benchmarkingenergia.cbcs.org.br/index.html>>. Acesso em: maio de 2018.

CHAE, Y. T.; KIM, J.; PARK, H.; BYUNGHA SHIN, B. Building energy performance evaluation of building integrated photovoltaic (BIPV) window with semi-transparent solar cells. **Applied Energy**, v. 129, p. 217-227, may 2014. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.106>

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A. Semi-transparent PV windows: A study for office buildings in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 67, n. 3, p. 136-142, dez. 2013. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.002>

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F. O. R. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 27-42, jul./set. 2014. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000300003>

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Documentation**. Versão 8.4. U. S. Department of Energy, Jan. 2016. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 19 Set. 2017.

FERREIRA, A. P.; SCOMPARIN, L. E. L.; CARIGNANI, G. Energia fotovoltaica em edifícios mato-grossenses: viabilidade econômica e energética de janelas fotovoltaicas. **Anais...** XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Canela, RS: ENTAC, 2010.

HACHEM, C.; ATHIENITIS, A.; FAZIO, P. Energy performance enhancement in multistory residential buildings. **Applied Energy**, v. 116, p. 9-19, Mar. 2014. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.018>

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. Aprova a revisão dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 22 set. 2010. Seção 1, p. 68. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=1599>. Acesso em: 04 jan. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria nº 50, de 01 de fevereiro de 2010. Aprova o aperfeiçoamento dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética de Edificações. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 06 fev. 2013. Seção 1, p. 87. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=1961>. Acesso em: 04 jan. 2018.

INMETRO. Tabela de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos. **Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia**, Ago. 2017. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabelas-comerciais.pdf>>. Acesso em: setembro de 2017.

KANT, K.; SHUKLA, A.; SHARMA, A.; BIWOLE, P. H. Thermal response of poly-crystalline silicon photovoltaic panels: Numerical simulation and experimental study. **Solar Energy**, v. 134, p. 147-155, Set. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.002>

KAPSIS, K.; DERMARDIROS, V.; ATHIENITIS, A. K. Daylight performance of perimeter office façades utilizing semi-transparent photovoltaic windows: a simulation study. **Energy Procedia**, v. 78, p. 334-339, nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.657>

KAPSIS, K.; ATHIENITIS, A. K. A study of the potential benefits of semi-transparent photovoltaics in commercial buildings. **Solar Energy**, v. 115, p. 120-132, may. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.016>

MIYAZAKI, T.; AKISAWA, A.; KASHIWAGI, T. Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows. **Renewable Energy**, v. 30, p. 281-304, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.05.010>

NG, P. K.; MITHRATNE, N.; KUA, H. W. Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 274-281, jul. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.029>

OLIVIERI, L.; CAAMAÑO-MARTIN, E.; OLIVIERI, F.; NEILA, J. Integral energy performance characterization of semi-transparent photovoltaic elements for building integration under real operation conditions. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 280-291, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.035>

PARK, K. E.; KANG, G. H.; KIM, H. I.; YU, G. J.; KIM, J. T. Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module. **Energy**, v. 35, p. 2681-2687, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.019>

PVSYST. **Pvsyst Software Photovoltaic**. 2017. Disponível em: <<http://www.pvsyst.com/en/>>. Acesso em: 15 de agosto de 2017.

RODRIGUES, T. T.; CARLO, J. C. Simulação Térmica de Sistemas BIPV por meio do EnergyPlus. XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. **Anais do evento**. Balneário Camboriú, SC, Set. 2017.

RODRIGUES, T. T. V.; CARLO, J. C.; OLIVEIRA FILHO, D. Thermal modeling of semi-transparent photovoltaics: impacts on the cell efficiency and on the zone performance. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 4, nov. 2018. ISSN 1980-6809. Available at: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8652785>>. Date accessed: 02 nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i4.8652785>

RORIZ, M. **Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos Arquivos EPW da Base Antac**. 2012. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/correcao_epw_antac.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2017.

SANTANA, M. V. Influência de Parâmetros Construtivos no Consumo de Energia de Edifícios de Escritório Localizados em Florianópolis-SC. Florianópolis, 2006. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TIWARI, G. N.; MISHRA, R. K.; SOLANKI, S. C. Photovoltaic modules and their applications: A review on thermal modelling. **Applied Energy**, v. 88, p. 2287-2304, Fev. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.005>

WANG, Y.; TIAN, W.; REN, J.; ZHU, L.; WANG, Q. Influence of a building s integrated-photovoltaics on heating and cooling loads. **Applied Energy**, v. 83, p. 989-1003, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.10.002>

ZHANG, W.; LU, L.; PENG, J.; SONG, A. Comparison of the overall energy performance of semi-transparent photovoltaic windows and common energy-efficient windows in Hong Kong. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 511-518, jul. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.016>

RESPONSABILIDADE INDIVIDUAL E DIREITOS AUTORAIS

A responsabilidade da correção normativa e gramatical do texto é de inteira responsabilidade do autor. As opiniões pessoais emitidas pelos autores dos artigos são de sua exclusiva responsabilidade, tendo cabido aos pareceristas julgar o mérito das temáticas abordadas. Todos os artigos possuem imagens cujos direitos de publicidade e veiculação estão sob responsabilidade de gerência do autor, salvaguardado o direito de veiculação de imagens públicas com mais de 70 anos de divulgação, isentas de reivindicação de direitos de acordo com art. 44 da Lei do Direito Autoral/1998: “O prazo de proteção aos direitos patrimoniais sobre obras audiovisuais e fotográficas será de setenta anos, a contar de 1º de janeiro do ano subsequente ao de sua divulgação”.

O CADERNOS PROARQ (issn 2675-0392) é um periódico científico sem fins lucrativos que tem o objetivo de contribuir com a construção do conhecimento nas áreas de Arquitetura e Urbanismo e afins, constituindo-se uma fonte de pesquisa acadêmica. Por não serem vendidos e permanecerem disponíveis de forma *online* a todos os pesquisadores interessados, os artigos devem ser sempre referenciados adequadamente, de modo a não infringir com a Lei de Direitos Autorais.

Submissão:14/12/2018

Aceite:25/04/2019