



AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA JANELA OPV PARA ILUMINAÇÃO NATURAL DE SALAS PROFUNDAS

EVALUATION OF THE DAYLIGHTING POTENTIAL OF OPV WINDOWS FOR DEEP-PLAN ROOMS

Letícia Karine Seki Uehara ¹

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, leticia.uehara@gmail.com

Aloísio Leoni Schmid ²

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, aloisio.schmid@gmail.com

Marcelo Perussi ³

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, m_perussi@hotmail.com

Vinicius Henrique Sezanosky Pinto ⁴

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, viniciusez@hotmail.com

Mylana de Oliveira ⁵

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, mylanaoliv@gmail.com

Resumo

Edifícios de escritório com múltiplos pavimentos, em sua maioria, possuem grandes superfícies envidraçadas que possibilitam aos usuários usufruir de luz e ventilação natural, além do contato do observador com o meio externo. Entretanto, sem um devido tratamento, essas superfícies podem possibilitar aumento/redução de carga térmica para o edifício, assim como causar ofuscamento nos trabalhadores. Neste sentido, a janela fotovoltaica poderia ser utilizada tanto para melhorar a distribuição da iluminação natural quanto para suplementar energia para iluminação artificial quando necessária. O objetivo dessa pesquisa é avaliar o potencial da aplicação de Dispositivos Orgânicos Fotovoltaicos (OPV) em janelas laterais de edifícios de escritórios com múltiplos pavimentos e salas profundas, a fim de verificar a sua contribuição em relação à qualidade da iluminação natural no ambiente interno. Realizou-se a avaliação por meio de um experimento com um modelo em escala reduzida de uma sala de escritório genérica, iluminada por uma janela lateral, a qual corresponde a 100% da área da fachada Norte. Compararam-se três tipos de materiais para a janela sob condição de céu real (nublado e claro) em Curitiba-PR: Cenário A - vidro simples 3 mm; Cenário B - vidro e OPV; e, Cenário C - vidro com aplicação de película solar. Apesar da redução da iluminância com a utilização dos materiais dos cenários B e C em relação ao material do cenário A, constatou-se uma melhor distribuição da iluminação natural no interior da sala, sendo que no cenário B existe a possibilidade de utilizar a energia gerada na janela fotovoltaica para a iluminação artificial.

Palavras-chave: Iluminação natural. Janela fotovoltaica. Dispositivo fotovoltaico orgânico. OPV.

Abstract

Generally, multi-storey office buildings count with large glazing surfaces that allow users to enjoy daylighting and natural ventilation and, in addition, provide visual contact with the outdoor environment. However, without an appropriate treatment, these surfaces could influence the buildings thermal loads, and moreover, cause glare in workers. Therefore, a photovoltaic window could be used not only to optimize daylight distribution but to provide energy to artificial lighting when necessary. This research aims to evaluate Organic Photovoltaic (OPV) application in side windows of multi-storey and deep plan office buildings to verify its contribution to the daylight quality of the internal environment. The evaluation was performed in a small-scale model of a generic office room, illuminated by a side window, corresponding to 100% of the North façade. Three window material types were compared under real sky condition (overcast and clear) in Curitiba-PR: scenario A - 3 mm single glass; scenario B - glass and OPV; and, scenario C - glass with solar film. Besides the reduction in illuminance resulting from scenarios B and C in relation to scenario A, a better daylighting distribution was noticed inside the room and, in addition, in scenario B there is also the possibility of using photovoltaic energy for artificial lighting.

Keywords: Daylighting. Photovoltaic window. Organic photovoltaic. OPV.

How to cite this article:

UEHARA, Letícia K. S. et al. Avaliação do potencial da janela OPV para iluminação natural de salas profundas. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 10, p. e01904, jan. 2019. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8652752>>. Acesso em: 30 dez. 2018. doi:<https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8652752>.

Received in 21.06.2018 - accepted in 05.12.2018

e01904-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 10, p. e01904, 2019, ISSN 1980-6809

Introdução

Edifícios de escritório com múltiplos pavimentos, em sua maioria, têm grandes superfícies envidraçadas que possibilitam aos usuários usufruir de luz e ventilação natural, além do contato do observador com o meio externo. Entretanto, sem um devido tratamento, essas superfícies podem possibilitar alteração da carga térmica para o edifício, assim como causar ofuscamento; que ocorre quando um objeto excessivamente brilhante, ou mais brilhante que o outro que pretendemos ver, encontra-se no nosso campo de visão (SCHMID, 2005).

Diversas tecnologias de janela têm sido desenvolvidas para otimizar o desempenho térmico e visual em edifícios. Hee *et al.* (2015) revisaram uma série de pesquisas que estudaram janelas com vidros estáticos (que possuem propriedades visuais e térmicas simples), janelas com vidros dinâmicos (que mudam as propriedades térmicas e visuais por meio de eletricidade – eletrocromica, ou temperatura – termotrópica), novas tecnologias de vidro (aerogel, material com mudança de fase, prismático e à vácuo) e janelas fotovoltaicas.

Organic Photovoltaics (OPV) é uma tecnologia fotovoltaica que tem despertado interesse por permitir integração ao edifício (*Building Integrated Photovoltaics*, BIPV), atuando como substituta de materiais convencionais, principalmente pela facilidade de aplicação em grandes áreas (SKANDALOS; KARAMANIS, 2015), pelo potencial de se adaptar a diferentes configurações arquitetônicas, leveza e transparência (CHEN *et al.*, 2012). Quando o material OPV substitui um sistema convencional de janela, pode potencialmente atuar como uma camada de proteção UV (radiação ultravioleta) e NIR (radiação próxima à infravermelha) e, conseqüentemente, reduzir a carga de resfriamento do ar-condicionado do edifício. Portanto, além da economia de energia, a janela fotovoltaica poderia converter a radiação indesejável em eletricidade valiosa (YAN *et al.*, 2013; SKANDALOS; KARAMANIS, 2015).

Em pesquisa realizada anteriormente, alguns dos presentes autores (SCHMID; UEHARA, 2017) estudaram o desempenho da iluminação de janelas fotovoltaicas multifuncionais (com células de silício policristalino e filme fino transparente). Como continuação, nesta pesquisa procurou-se avaliar o potencial da janela multifuncional OPV para a iluminação de salas profundas em edifícios de escritório com fachada de vidro. Como estratégia, optou-se por um experimento com modelo em escala reduzida, a fim de verificar a sua contribuição em relação à qualidade da iluminação natural no ambiente interno.

Fundamentação

OPV

Em 2000, os cientistas Alan Jay Heeger, Alan MacDiarmid e Hideki Shirakawa receberam o prêmio Nobel de Química pela descoberta e desenvolvimento de polímeros condutores (MLA, 2017), também conhecidos por metais sintéticos (YAMAMOTO, 2014). Essa descoberta tem sido utilizada em diversas aplicações, como na camada ativa de diodos emissores de luz orgânicos (OLEDs) e em dispositivos fotovoltaicos orgânicos (OPV) (BASSI, 2017).

A tecnologia OPV é interessante pela promessa de baixo custo, leveza, matéria-prima encontrada em abundância, baixa toxicidade dos materiais, arquitetura simples, flexibilidade, semitransparência, variedade de cor, sensibilidade a baixos níveis de luz, facilidade de utilização em grandes áreas, e processo de manufatura fácil, rápido e escalonável na impressão rolo a rolo (JØRGENSEN *et al.*, 2013; YAN *et al.*, 2013; DING *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2012; SAKANDALOS; KARAMANIS, 2015).

O OPV encontra-se disponível no mercado em aplicações rígidas e flexíveis; e pode ser usado em estufas, teto de carro, embalagens, carregadores de celulares e dispositivos portáteis, cobertura de parada de ônibus, nos telhados e nas janelas, etc. (YAN *et al.*, 2013; DING *et al.*, 2016; SAKANDALOS; KARAMANIS, 2015). A Figura 1 ilustra alguns exemplos de aplicação do OPV: no ponto de ônibus (esquerda), na fachada do edifício (centro) e um exemplo diferente de aplicação refere-se a uma árvore com folhas em policarbonato curvo com um adesivo OPV aplicado (direita).

Figura 1 – Exemplos de aplicação de OPV

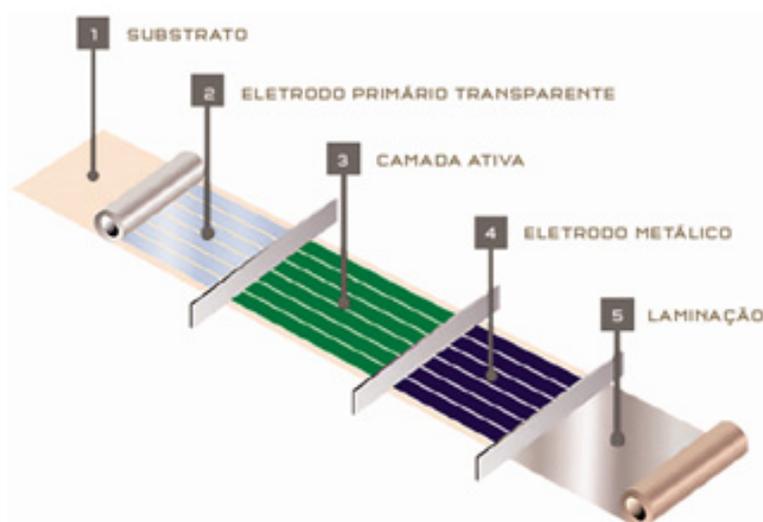


Fonte: Paiva (2017).

Segundo o NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), a atual eficiência do OPV é de aproximadamente 13,2% (NREL, 2017).

O OPV semitransparente abordado nesta pesquisa foi fabricado através do processo rolo a rolo com uma estrutura invertida, totalizando cinco camadas, conforme apresentado na Figura 2. O intuito da utilização do OPV não é de competir com o material fotovoltaico inorgânico, mas sim destiná-lo a aplicações específicas, como em embalagens, roupas, guarda-sóis, entre outros. Cobertas por células solares, poderiam fornecer energia para carregar celulares e outros dispositivos portáteis (BASSI, 2017).

Figura 2 – Camadas do OPV



Fonte: Paiva (2017).

Tipos de céu

Quando a luz solar (ou seja, a parcela visível da radiação solar) atinge um local sem ter sofrido dispersão dentro da atmosfera terrestre é chamada de luz solar direta, por outro lado, a luz que sofreu dispersão na atmosfera é chamada de luz natural difusa. Caso o

céu presente em sua maior parte luz solar direta, é classificado como céu claro, entretanto, quando não é possível perceber a componente direta da luz, é chamado de céu nublado e entre as duas classificações se encontra o céu intermediário (REINHART, 2014).

No céu nublado não há luz solar direta atingindo o solo, a coroa solar não é visível e a luz de céu é uniformemente difundida. Neste tipo de céu, a luminância do céu é menor no horizonte do que no zênite. No céu claro não há significativa presença de nuvens e o modelo de distribuição de luminâncias se baseia inteiramente na luz do sol dispersa em sua passagem pela atmosfera, chamada de luz do céu ou luz difusa. O céu intermediário ou parcialmente nublado é um tipo de céu dos mais frequentes em território brasileiro, entretanto, possui ainda um conhecimento limitado, especialmente em relação ao seu formato, grau de cobertura e tipo mais frequente de nuvens (SOUZA; PERREIRA, 2004).

A NBR 15215-2 (ABNT, 2005a) caracteriza o céu de acordo com o montante de cobertura das nuvens, que é estimada em percentual e expressa numa escala de 0 a 100%.

- a) céu claro: 0 % a 35% de cobertura de nuvem;
- b) céu parcial: 35% a 75% de cobertura de nuvem;
- c) céu nublado: 75% a 100% de cobertura de nuvem.

Método

O método utilizado é experimental, com ensaios feitos em um modelo em escala reduzida (1:7,5) para avaliação dos dados de iluminância no plano de trabalho, sob condições de céu real (céu claro e céu nublado). O experimento foi realizado no bloco de Ciências Exatas (Figura 3), localizado no campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), na cidade de Curitiba-PR. Realizaram-se as medições sob condição de céu nublado nos dias 06 e 08 de novembro e céu claro nos dias 12 e 13 de novembro de 2017, em horários alternados.

Figura 3 – Local das medições destacado em amarelo



Fonte: Adaptado do Google Maps (2018).

Modelo físico em escala reduzida

Nesta pesquisa optou-se pela criação de um modelo em escala reduzida para o estudo da iluminação natural em uma sala de escritório genérica com planta profunda para se

ter uma base de dados da distribuição da luz sob condição de céu real (céu claro e céu nublado).

Os modelos físicos podem ser utilizados para analisar soluções de projeto em uma representação tridimensional, permitindo verificar se o espaço foi modelado corretamente (como em relação ao espaço e à fotometria). Com eles, é possível avaliar a iluminação natural, pois não é necessário fazer correção de escala para a luz natural (AGHEMO; PELLEGRINO; LOVERSO, 2007). Segundo Luz (2009) o modelo físico deve ser detalhado para atender aos objetivos de cada estudo específico.

Para avaliação da penetração e distribuição de luz natural recomenda-se utilizar modelos de grande escala, sendo que a NBR 152515-4 (ABNT, 2005b) sugere como escala ideal para os modelos 1:10 ou 1:20 e faz as seguintes recomendações:

- a) construir modelos em escala não menor do que 1:40;
- b) garantir que todas as superfícies estejam presentes (modelos seccionados não são adequados);
- c) adequar as refletividades das superfícies e representar o mais corretamente possível as refletividades das superfícies reais;
- d) evitar modelos mal executados onde possam ocorrer vazamentos de luz em suas juntas;
- e) garantir que as obstruções externas apresentem tamanhos e refletividades corretas;
- f) modelar adequadamente os detalhes das aberturas;
- g) planejar com antecedência as posições das medições.

Métrica

Diversas métricas são utilizadas para avaliar a influência do projeto na distribuição da luz natural em um espaço interno. Assim como em pesquisa anterior realizada pelos autores (SCHMID; UEHARA, 2017), esta pesquisa utiliza como métrica o Fator de Luz do Dia (FLD), que representa a relação entre a iluminância horizontal interna e a iluminância horizontal externa não obstruída (MARDALJEVIC; CHRISTOFFERSEN, 2013).

Geometria e materiais do modelo

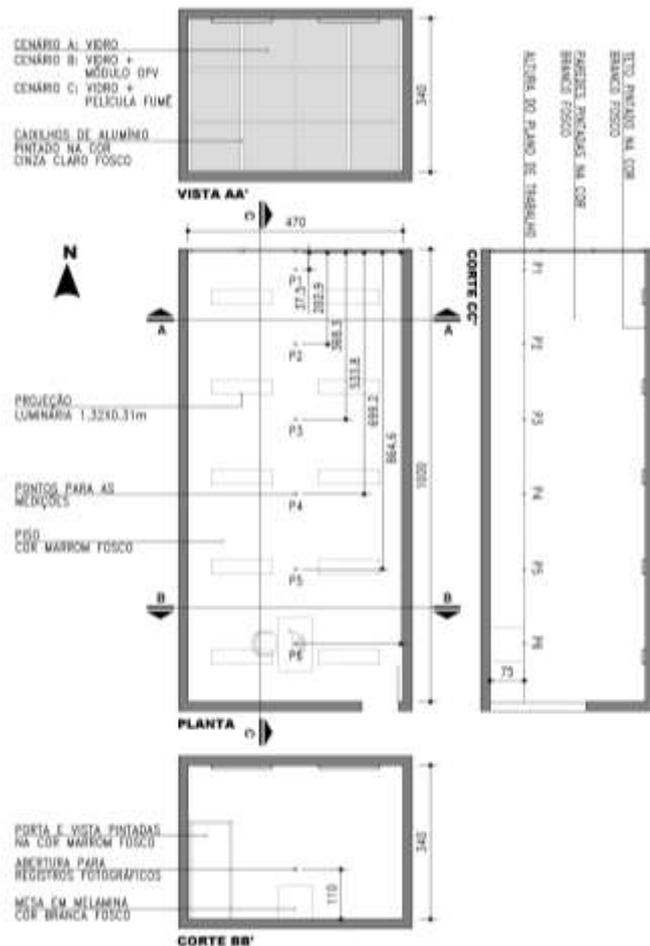
A Figura 4 apresenta a geometria do modelo utilizado. O modelo corresponde a uma sala de escritório genérica medindo 4,70 m (largura) x 10,00 m (profundidade) e 3,40 m (pé-direito). O comprimento é alinhado com o eixo norte-sul. A sala tem janela lateral em toda a face orientada para o norte (4,70 m x 3,40 m). O modelo foi confeccionado na escala 1:7,5.

Os materiais utilizados para a construção do modelo em escala reduzida e a refletância de cada um deles são mostrados na Tabela 1. Para a medição de iluminância na altura do plano de trabalho (75 cm), foi confeccionada uma mesa que foi disposta no fundo da sala (afastada aproximadamente 8,65 m da janela). Em uma das faces de dimensão 4,70 m x 3,40 m, que corresponde à fachada de vidro, posicionou-se os diferentes materiais para a janela: cenário A – vidro comum 3 mm incolor (transmitância 90%); cenário B – igual ao cenário A mais módulo fotovoltaico OPV (transmitância da faixa clara 60%; transmitância da faixa escura 8%); e cenário C – igual ao A mais aplicação de película solar fumê (transmitância 9%).

Para verificar se a película solar escolhida poderia ser comparada com o módulo fotovoltaico, os alunos do Laboratório de Dispositivos NanoEstruturados (DiNE) do

Departamento de Física da UFPR, submeteram o material dos cenários B e C a um teste de UV-VIS por meio de espectrofotômetro (modelo NIR2101, marca Shimadzu). Este teste possibilitou a comparação da transmitância e da absorbância do material por comprimento de onda.

Figura 4. Geometria do modelo para simulação



Fonte: Os autores.

Tabela 1 –Refletâncias das superfícies internas

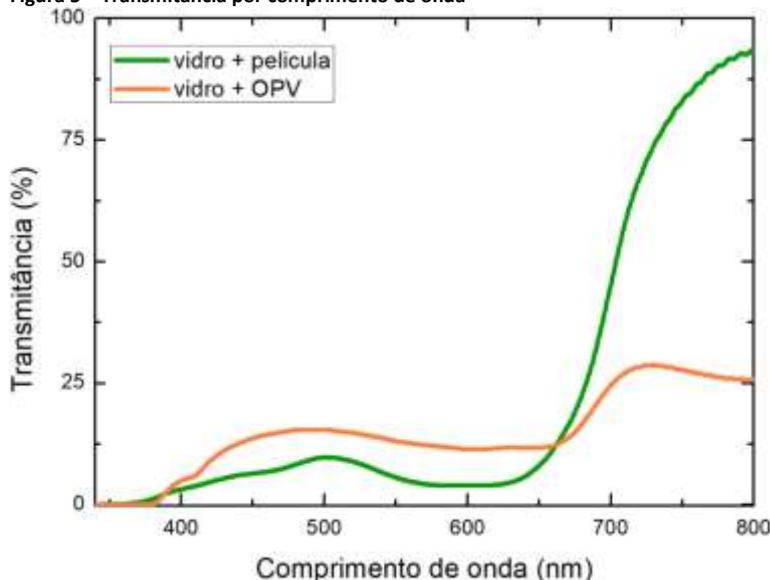
Superfície	Material	Refletância		
		R	G	B
Paredes e teto	Pintura branca fosca	0,95	0,95	0,95
Piso, porta e rodapé	Pintura marrom fosca	0,38	0,24	0,15
Janela 1: cenário A	Vidro transparente	0,90	0,90	0,90
Janela 2: cenário B	Vidro faixa incolor	0,00	0,045	0,90
	Vidro faixa azul	0,28	0,33	0,30
Janela 3: cenário C	Vidro verde escuro	0,19	0,172	0,16
Caixilhos	Pintura cinza fosca	0,691	0,696	0,615
Mesas	Papel branco	0,70	0,60	0,50
Luminárias (exterior)	Papel branco	0,623	0,672	0,692
Luminárias (interior)	Papel prateado	0,95	0,95	0,95

Fonte: Os autores.

Observa-se no gráfico da transmitância (Figura 5) que o OPV apresenta uma vantagem sobre a película solar, pois permite uma maior passagem da luz visível (400 a 750 nm) e o gráfico da absorbância (Figura 6) nos mostra que ambos os materiais se comportam de maneira similar em relação à energia absorvida, o que torna vantajosa a utilização do

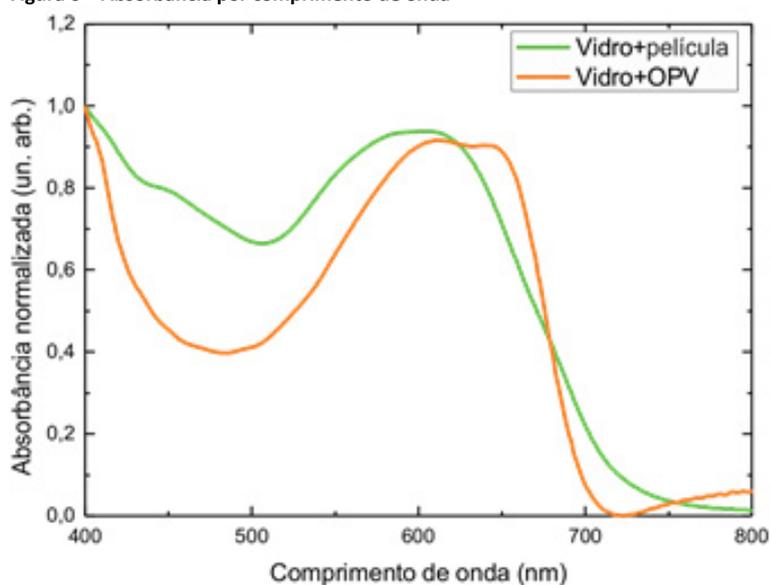
OPV, que transforma a radiação indesejável em eletricidade, e que por sua vez pode ser utilizada para a iluminação artificial.

Figura 5 – Transmitância por comprimento de onda



Fonte: Os autores.

Figura 6 – Absorbância por comprimento de onda



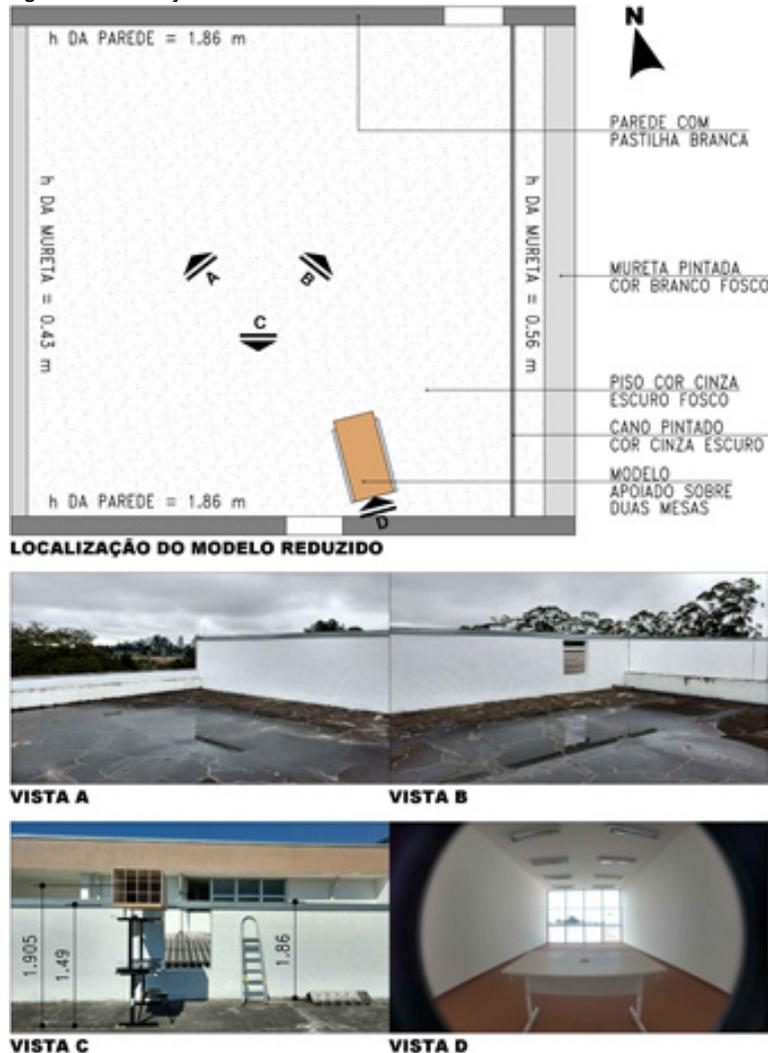
Fonte: Os autores.

Medições sob condição de céu real

Para a realização das medições, adotou-se os critérios de caracterização de céu sugeridos pela ABNT 15215-2 (ABNT, 2005a) para condições de céu claro e céu nublado, por tratar-se de duas condições extremas de distribuição de luminância do céu, mais fáceis de identificar sem que existam dados precisos de uma estação de medição de iluminação natural. O site AccuWeather¹ foi consultado para se obter uma previsão do percentual de cobertura das nuvens durante o período desejado para a realização da medição. Os horários para as medições ficaram sujeitos à verificação se o céu se enquadrava nas condições desejadas (céu claro – cenários de 1 a 4 e céu nublado – cenários de 5 a 8).

O local escolhido para a disposição do modelo foi em uma laje de cobertura do bloco de Ciências Exatas do Campus Centro Politécnico da UFPR. A Figura 7 mostra as características do entorno e a localização do modelo no entorno.

Figura 7 – Localização do modelo no entorno



Fonte: Os autores.

A vista C apresenta uma foto do modelo com a altura do meio da fachada (1,905 m) e a altura da parede (1,80 m). Posicionou-se o modelo sobre duas mesas para que pelo menos 2/3 da fachada tivesse a vista para o céu aberto, como mostrado na vista D. Antes do início das medições, realizou-se a leitura de um *checklist* para o conhecimento da sequência de todos os procedimentos a serem adotados pela equipe. A sequência das etapas da medição é mostrada na Figura 8.

Primeiramente, verificou-se a inexistência de vãos ou pequenas aberturas por onde a luz pudesse penetrar no modelo. Posteriormente, mediu-se a luminância do céu (Figura 8.a) e realizaram-se registros fotográficos com a lente grande angular.

Figura 8. Método para medições



Fonte: Os autores.

Para o início das medições, posicionou-se o vidro comum na fachada do modelo reduzido. Depois, realizou-se os registros fotográficos do interior do modelo por meio de uma abertura com o mesmo diâmetro (2,5 cm) da lente olho-de-peixe, localizado no centro da parede mais afastada da janela e a 1,10 m do piso na escala do modelo, que corresponde à altura média dos olhos de uma pessoa sentada. Após a realização das fotografias, a abertura do fundo do modelo foi vedada com fita isolante para evitar a infiltração da luz externa no interior do modelo durante as medições.

Na sequência, mediu-se a iluminância horizontal em um ponto acima do modelo (Figura 8.b), com o luxímetro direcionado para cima. Depois, mediu-se a iluminância na altura do plano de trabalho (75 cm) (Figura 8.c) em seis pontos no interior do modelo (sendo o ponto 1 o mais próximo da janela e o 6 o mais afastado) (Figura 4), para isto, posicionou-se o luxímetro em aberturas feitas na face inferior do modelo (piso). As aberturas no piso para o posicionamento do luxímetro foram vedadas com papel triplex pintado na mesma cor do piso para evitar a infiltração da luz externa no interior do modelo. Todas as etapas (das figuras 8.a, 8.b e 8.c) foram repetidas para os demais cenários, cenário B (Figura 8.d e 8.e) e C (Figura 8.f).

Posicionou-se apenas uma mesa no interior do modelo, pois a principal intenção é apenas para efeito de demonstração da altura do plano de trabalho, assim como um ponto de referência para análise qualitativa do conforto visual naquela região da sala (ponto mais afastado da janela) por meio dos registros fotográficos. Os dados obtidos por meio das medições foram registrados em uma planilha no programa Excel e na sequência, calculou-se o FLD por meio da Equação 1:

$$FLD = \frac{E_{int}}{E_{ext}} \times 100 \quad (1)$$

Onde

E_{int} : Iluminância horizontal interna medida na altura do plano de trabalho (75 cm);

E_{ext} : Iluminância horizontal externa medida em um ponto localizado logo acima do modelo reduzido.

Resultados e discussão

Realizou-se medições da iluminância horizontal no interior do modelo reduzido ao longo do eixo central nos seis pontos indicados na Figura 4, para os três tipos de janela, em quatro horários distintos para cada tipo de céu (claro e nublado), totalizando 24 cenários. Os dados coletados nas medições foram utilizados para o cálculo do FLD e são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Dados de iluminância coletados sob condição de céu nublado

Cenário	A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3	A4	B4	C4	
Dia	06/11/2017			06/11/2017			08/11/2017			08/11/2017			
Hora	13h45/14h00/14h15			17h15/17h30/17h45			08h45/09h00/09h10			12h25/12h35/12h40			
Iluminâncias $E_{p1, \dots, p6}$	EP1	4760	812	628	2727	211	112	4470	500	530	3670	498	580
	EP2	2530	470	313	1120	111	55	2495	291	290	1652	266	300
	EP3	1060	172	141	380	48	27	1038	147	137	634	117	131
	EP4	610	100	96	242	30	16	644	90	80	377	68	82
	EP5	460	75	65	190	23	13	434	71	66	301	54	62
	EP6	436	69	60	182	22	12	398	68	64	289	51	56

Nota: A – Vidro simples, B – Vidro e módulo OPV, C – Vidro e película solar fumê. Fonte: Os autores.

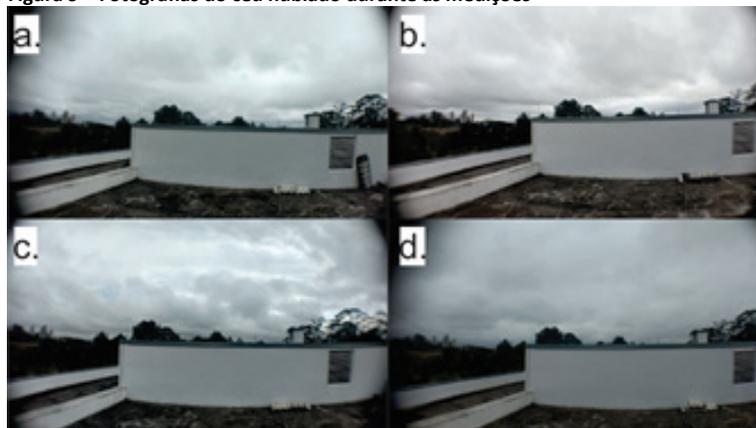
Tabela 3 – Dados de iluminância coletados sob condição de céu claro

Cenário	A5	B5	C5	A6	B6	C6	A7	B7	C7	A8	B8	C8	
Dia	12/11/2017			12/11/2017			12/11/2017			13/11/2017			
Hora	13h00/13h25/13h35			15h25/15h40/16h00			17h15/17h30/17h40			13h00/13h15/13h25			
Iluminâncias $E_{p1, \dots, p6}$	EP1	2660	690	330	2274	316	243	1895	273	187	3130	760	352
	EP2	1818	295	240	1650	256	215	1477	225	171	1903	305	250
	EP3	1050	177	156	1014	167	150	934	156	127	1163	171	168
	EP4	695	107	97	651	107	103	662	111	95	706	112	105
	EP5	495	78	70	497	85	80	575	93	84	505	81	76
	EP6	432	71	65	485	84	79	599	98	90	441	74	68

Nota: A – Vidro simples, B – Vidro e módulo OPV, C – Vidro e película solar fumê. Fonte: Os autores.

Os registros fotográficos realizados com a lente grande angular para determinar as características de luminância do céu nublado são apresentados na Figura 9. As Figuras 9.a e 9.b correspondem ao céu do dia 6/11/2017, às 13h45 e às 17h00, respectivamente. As Figuras 9.c e 9.d mostram o céu do dia 08/11/2017, às 08h45 e 12h25, respectivamente.

Figura 9 – Fotografias do céu nublado durante as medições



Fonte: Os autores.

A Figura 10 mostra as características de luminância do céu durante as medições sob céu claro. As Figuras 10.a, 10.b e 10.c correspondem ao céu do dia 12/11/2017, às 13h00, às 15h25 e às 17h15, respectivamente. A Figura 10.d mostra o céu do dia 13/11/2017, às 13h.

Figura 10 – Fotografias do céu claro durante as medições



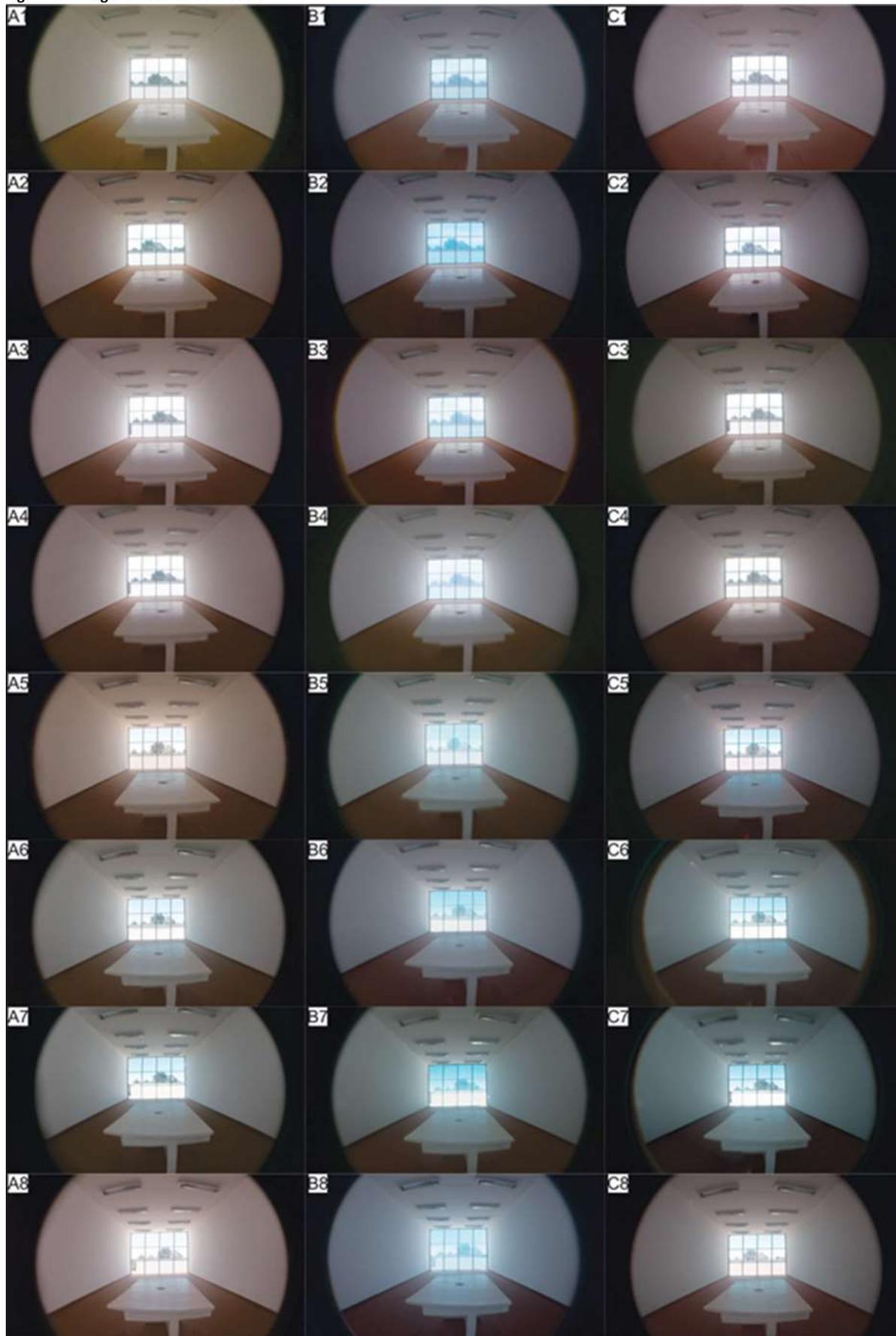
Fonte: Os autores.

As imagens do interior do modelo reduzido foram capturadas em cinco valores de exposição diferentes (-2, -1, 0, 1 e 2) da câmera do celular com uma lente olho-de-peixe. Depois, as cinco imagens obtidas foram combinadas no *software* Luminance 2.5.1 para Windows e, assim, obteve-se imagens com grande amplitude dinâmica ou do inglês *High Dynamic Range* (HDR). A Figura 11 mostra as imagens obtidas durante as medições, que possibilitaram realizar uma análise qualitativa dos diferentes cenários.

Por meio das imagens internas do modelo reduzido é possível observar que, nos cenários sob céu nublado, um fluxo menor de luz natural atinge o fundo da sala, porém, ele se espalha de maneira mais homogênea pelo espaço interno. As imagens sugerem mudanças sutis entre os cenários sob condição de céu nublado. No caso dos cenários sob condição de céu claro, mais luz natural atinge o fundo da sala, entretanto existe um alto contraste entre esta região e as áreas vizinhas à janela que recebem luz solar direta. Nos cenários com o vidro comum (A5-A8) esta situação pode ocasionar ofuscamento, entretanto, nos cenários com OPV (B5-B8) e película solar (C5-C8) o brilho da região próxima à janela é reduzido e a luz natural se espalha de maneira mais homogênea pelo interior da sala.

Como a luz do dia muda constantemente, não é comum utilizar valores de iluminância para descrever a iluminação natural. Ao invés disso, a iluminação natural é descrita usando o FLD (BAKER; STEEMERS, 2000), que é a razão entre a iluminância interna e a iluminância externa ao modelo, expressa em porcentagem. Mesmo com a variação da iluminância externa, o FLD permanece aproximadamente constante, e isto porque a iluminação interna se modifica simultaneamente com a luz do dia externa (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1980). Os resultados de FLD para céu nublado são apresentados na Tabela 4 e para céu claro na Tabela 5.

Figura 11. Imagens internas do modelo



Fonte: Os autores.

Tabela 4 – Fator de luz do dia para os diferentes cenários sob céu nublado

Cenário	A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3	A4	B4	C4	
E_{ext} (Klux)	17,9	26,3	22,4	11,3	7,8	4,42	19,3	15,3	16,9	14	15,7	21,1	
FLD (%)	FLD _{P1}	26,6	3,1	2,8	24,1	2,7	2,5	23,2	3,3	3,1	26,2	3,2	2,7
	FLD _{P2}	14,2	1,8	1,4	9,9	1,4	1,2	13	1,9	1,7	11,8	1,7	1,4
	FLD _{P3}	5,9	0,7	0,6	3,4	0,6	0,6	5,4	1	0,8	4,5	0,7	0,6
	FLD _{P4}	3,4	0,4	0,4	2,1	0,4	0,4	3,3	0,6	0,5	2,7	0,4	0,4
	FLD _{P5}	2,6	0,3	0,3	1,7	0,3	0,3	2,3	0,5	0,4	2,2	0,3	0,3
	FLD _{P6}	2,4	0,3	0,3	1,6	0,3	0,3	2,1	0,4	0,4	2,1	0,3	0,3

Fonte: Os autores.

Tabela 5 – Fator de luz do dia para os diferentes cenários sob céu claro

Cenário	A5	B5	C5	A6	B6	C6	A7	B7	C7	A8	B8	C8	
E_{ext} (Klux)	91,2	89,2	90	73,6	72,2	65,8	36	22,2	14,4	90,1	89,6	90	
FLD (%)	FLD _{P1}	2,9	0,77	0,37	3,1	0,4	0,4	5,3	1,2	1,3	3,5	0,85	0,39
	FLD _{P2}	2	0,33	0,27	2,2	0,4	0,3	4,1	1	1,2	2,1	0,34	0,28
	FLD _{P3}	1,2	0,20	0,17	1,4	0,2	0,2	2,6	0,7	0,9	1,3	0,19	0,19
	FLD _{P4}	0,8	0,12	0,11	0,9	0,1	0,2	1,8	0,5	0,7	0,8	0,12	0,12
	FLD _{P5}	0,5	0,09	0,08	0,7	0,1	0,1	1,6	0,4	0,6	0,6	0,09	0,08
	FLD _{P6}	0,5	0,08	0,07	0,7	0,1	0,1	1,7	0,4	0,6	0,5	0,08	0,08

Fonte: Os autores.

Os gráficos das Figura 12 (condição de céu nublado) e Figura 13 (condição de céu claro) comparam os valores de FLD calculados para os 24 cenários analisados.

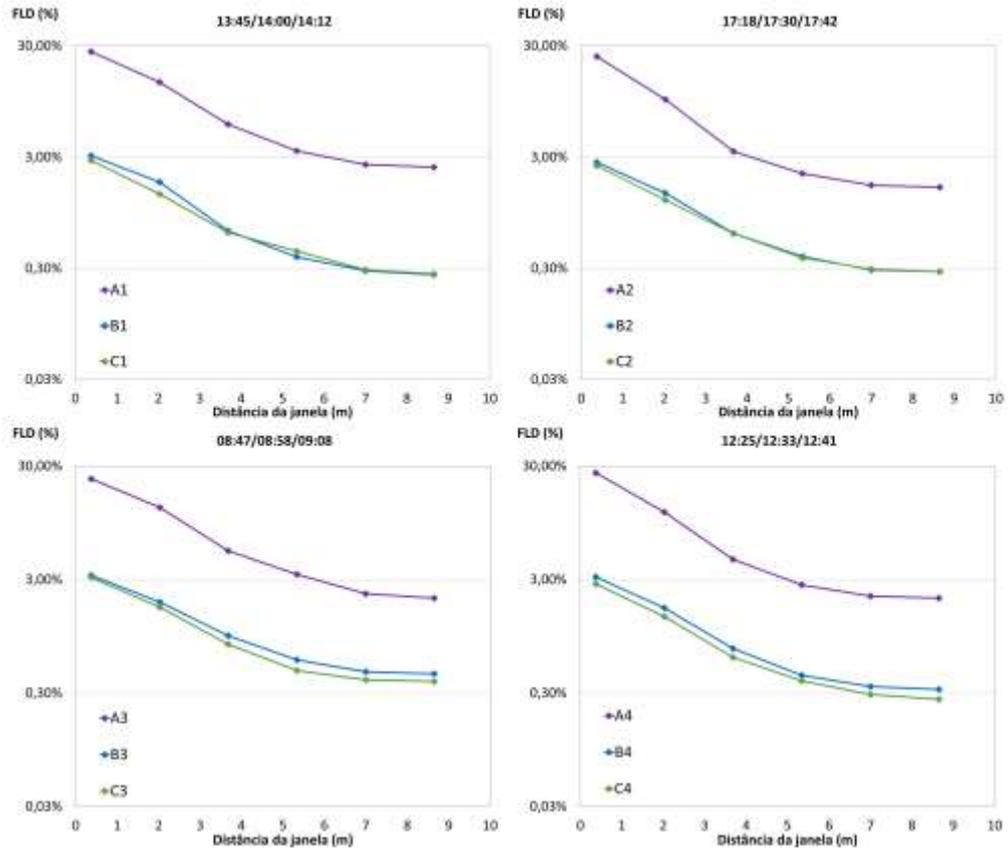
Observou-se que os cenários com o vidro comum (cenário A) apresentaram valores elevados de FLD, principalmente nas áreas próximas às janelas e sob condição de céu nublado, que chegou a 26,6% no cenário A1. Portanto, nessas condições faz-se necessária a utilização de um sistema de controle de iluminação natural.

Os cenários B (B1 a B8) e C (C1 a C8) se comportam de maneira similar, com algumas vantagens da janela com o módulo fotovoltaico (cenário B) em relação à janela com aplicação de película solar fumê (cenário C): o FLD é mais elevado nos diferentes pontos ao longo da sala e na região próxima à fachada. Onde existe a possibilidade de ofuscamento, os valores do FLD estão mais próximos, ou seja, nessa região ambos contribuem para a redução do ofuscamento de uma maneira similar.

Na comparação entre os cenários A, B e C, observa-se uma queda dos valores de iluminância nos cenários B e C, maior do que nos cenários A. Porém, nos cenários A, existe a possibilidade de ofuscamento pelo alto contraste entre a iluminação interna e a externa, sendo que no caso dos demais cenários B e C, a luz natural é distribuída de uma maneira mais homogênea no ambiente e assim diminui a possibilidade de ofuscamento.

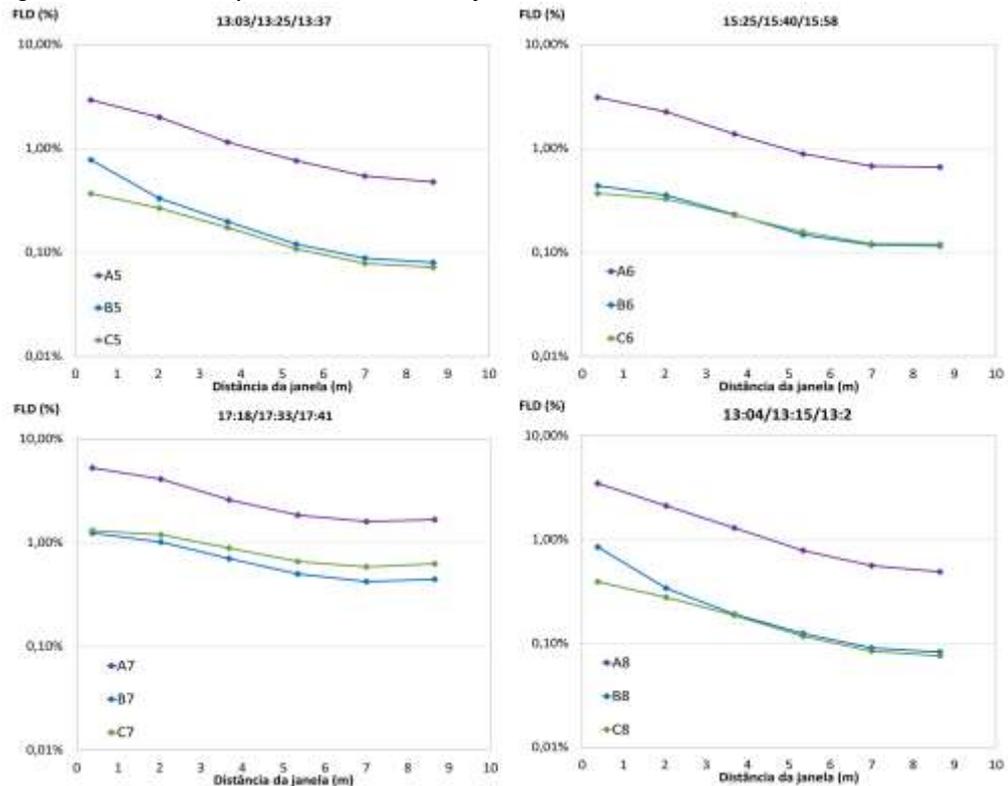
Portanto, a janela com o módulo fotovoltaico OPV pode ser um substituto da película solar para controle da iluminação natural no interior dos edifícios de escritório e, além disso, tem como vantagem o fornecimento de energia limpa para a iluminação artificial quando os níveis de iluminação natural não forem suficientes para desempenhar uma determinada tarefa.

Figura 12. Valores de FLD para os cenários sob condição de céu nublado



Fonte: Os autores.

Figura 13. Valores de FLD para os cenários sob condição de céu claro



Fonte: Os autores.

Conclusão

Esta pesquisa investigou uma tecnologia fotovoltaica, o OPV, para aplicação em janela lateral em edifício de escritório de múltiplos pavimentos com planta profunda. Comparou-se o OPV com dois tipos de materiais para janela: vidro comum e vidro comum com aplicação de película solar. O objetivo restringiu-se a avaliar o OPV em termos de iluminância, não incluindo ganhos térmicos e quantidade de energia produzida pela janela fotovoltaica. O experimento com o modelo em escala reduzida de uma sala genérica de escritório com planta profunda possibilitou obter dados de distribuição de iluminância no eixo central da sala (norte-sul) e, a partir disso, calculou-se o Fator de Luz do Dia (FLD), que relaciona a quantidade de luz natural no exterior com a quantidade de luz que incide sobre determinado ponto no interior da sala. Os resultados mostraram que os cenários com vidro comum (sob condição de céu nublado A1 a A4; e sob céu claro A5 a A8) apresentam valores de FLD sempre elevados, conseqüentemente nessas condições faz-se necessário adotar uma estratégia para controle de ofuscamento. Os demais cenários com OPV (B1 a B8) e com película solar (C1 a C8) apresentam valores de FLD muito aproximados, portanto, esses materiais comportam-se de maneira similar em relação à quantidade de luz natural que penetra no ambiente interno, com uma pequena vantagem para o OPV, que possibilita um nível de iluminância um pouco maior em pontos mais distantes de janela e reduz o ofuscamento de maneira similar à película nas áreas próximas à janela. Além disso, o OPV pode ser integrado ao sistema de iluminação artificial, permitindo que a energia gerada na janela fotovoltaica possa ser utilizada quando os níveis de iluminação natural não forem suficientes, de modo que um trabalhador sentado a um ponto distante da janela possa exercer as suas atividades com condições ideais de iluminação.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à empresa SUNEW pelo empréstimo do módulo fotovoltaico OPV para a realização do experimento; à professora Lucimara Stolz Roman e aos alunos do Laboratório de Dispositivos NanoEstruturados (DiNE) da UFPR pela ajuda durante todo o experimento e principalmente pela produção dos gráficos de absorvância e transmitância; e, ao apoio do PPGCEC da UFPR.

Notas

(1) ACCUWEATHER. Disponível em: <http://www.accuweather.com>. Acesso em: 21 jul. 2017.

Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15215-2**: Iluminação natural - Parte 2 - Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-4**: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição. Rio de Janeiro, 2005b.

AGHEMO, C.; PELLEGRINO, A.; LOVERSO, V.R.M. The approach to daylighting by scale models and sun and sky simulators: A case study for different shading systems. **Building and Environment**, v. 43, p. 917-927, 2008. DOI:<http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.020>

BAKER, N.; STEEMERS, K. **Energy and Environment in Architecture: A technical design guide**. Londres: E & FN SPON, 2000.

BASSI, M. D. J. **Estudo do efeito do tratamento térmico e aditivo na camada ativa de células solares orgânicas na estrutura de heterojunção em volume**. 2017. 94 f.. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CHEN, K.-S. et al. Semi-Transparent polymer solar cells with 6% PCE, 25% average visible transmittance and a color rendering index close to 100 for power generating window applications. **Energy & Environ. Sci.**, v. 5, p. 9551, 2012. DOI:<http://doi.org/10.1039/c2ee22623e>

DING, Z. et al. Spray coated nanowires as transparent electrodes in OPVs for Building Integrated Photovoltaics applications. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 157, p. 305-311, 2016. DOI:<http://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.05.053>

HEE, W. J. et al. The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. **Renew. Sustain. Energy Reviews**, v. 42, p. 323-343, 2015. DOI:<http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.020>

HOPKINSON, R.G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Iluminação natural**. 2.ed. Lisboa: Fundação C. Gulbenkian, 1980.

JØRGENSEN, M. et al. The state of organic solar cells - A meta-analysis. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 119, p. 84-93, 2013. DOI:<http://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.05.034>

LUZ, B. **Condução da luz natural por sistemas não convencionais**. 2009. 171 f.. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MARDALJEVIC, J.; CHRISTOFFERSEN, J. A proposal for a European standard for daylight in buildings. In: EUROPEAN LIGHTING CONFERENCE, 12., 2013, **Proceedings [...]**. Cracóvia: LUX EUROPA., 2013.

MLA style: **The Nobel Prize in Chemistry 2000**. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2017. Disponível em: <http://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2000/summary/>. Acesso em: 21 jul. 2017.

NREL - NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Photovoltaic Research: Organic Photovoltaic Solar Cells**. Disponível em: <http://www.nrel.gov/pv/organic-photovoltaic-solar-cells.html>. Acesso em: 20 de set. 2017.

PAIVA, C. Brasil sai na frente com energia solar OPV. **Arcoweb**, 2017. Disponível em: <http://www.arcoweb.com.br/finestra/tecnologia/tecnologia-brasil-sai-na-frente-com-energia-solar-opv>. Acesso em: 21 jul. 2017.

REINHART, C. F. **Daylighting Handbook I: Fundamentals, Designing with the Sun**. USA, 2014. ISBN: 9780692203637.

SCHMID, A. L. **A ideia de conforto: reflexões sobre o ambiente construído**. 1. ed. Curitiba: Pacto Ambiental, 2005. 340 p.

SCHMID, A. L.; UEHARA, L. K. Lighting performance of multifunction PV windows: A numeric simulation to explain illuminance distribution and glare control in offices. **Energy and Buildings**, v. 154, p. 590-605, 2017. DOI:<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.040>

SKANDALOS, N.; KARAMANIS, D. PV glazing technologies. **Renew. Sustain. Energy Reviews**, v. 49, p. 306-322, 2015. DOI:<http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.145>

SOUZA, R. V. G.; PEREIRA, F. O. R. First daylight measurement station in the Brazilian territory: analysis of the first two years of data collection. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 79-94, jul./set. 2004.

YAMAMOTO, N. A. D. **Células solares orgânicas baseadas nas estruturas heterojunção em bicamada e heterojunção volume**. 2014. 132 f. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

YAN, F. et al. Semitransparent OPV modules pass environmental chamber test requirements. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 114, p. 214-218, jul. 2013. DOI:<http://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.09.031>

¹ Letícia Karine Seki Uehara

Arquiteta e Urbanista. Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR. Endereço postal: UFPR – Campus Centro Politécnico, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Rua Francisco H. dos Santos, 100, Curitiba, Paraná, Brasil, CEP: 81531-990.

² Aloísio Leoni Schmid

Engenheiro Mecânico. Doutor. Professor da UFPR. Endereço postal: UFPR – Campus Centro Politécnico, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Rua Francisco H. dos Santos, 100, Curitiba, Paraná, Brasil, CEP: 81531-990.

³ Marcelo Perussi

Designer de Produtor. Especialista. Técnico de Laboratório da UFPR. Endereço postal: UFPR – Campus Centro Politécnico, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Rua Francisco H. dos Santos, 100, Curitiba, Paraná, Brasil, CEP: 81531-990.

⁴ Vinicius Henrique Sezanosky Pinto

Graduando em Arquitetura e Urbanismo no Campus Centro Politécnico, Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Endereço Postal: Rua Francisco H. dos Santos, 100, Curitiba, Paraná, Brasil, CEP: 81531-990.

⁵ Mylana de Oliveira

Graduanda em Arquitetura e Urbanismo no Campus Centro Politécnico, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Endereço Postal: Rua Francisco H. dos Santos, 100, Curitiba, Paraná, Brasil, CEP: 81531-990.