

ENTENDENDO O COMPORTAMENTO DO USUÁRIO NO CONTROLE DA ILUMINAÇÃO EM ESCRITÓRIOS INDIVIDUAIS

João Roberto Gomes de Faria (1)

(1) Professor Livre Docente, joaofari@faac.unesp.br, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP – Univ Estadual Paulista, Depto. de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, Av Eng Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, 17033-360 – Bauru, SP, Tel. (14) 3103-6059 R. 7240

RESUMO

Ambientes de trabalho bem iluminados com a luz do dia possibilitam o bom desempenho das atividades visuais e a economia de energia, além de proporcionar aos usuários o conforto visual e uma série de outros benefícios fisiológicos e psicológicos, como percepção do ciclo diurno, regulação do ciclo circadiano e sensação de vitalidade. No entanto, nem sempre o usuário adota medidas para maximizar seu uso. Resultados de um estudo anterior realizado em escritórios individuais de professores de dois prédios no campus de Bauru (SP) da UNESP mostraram que maioria dos usuários prefere a iluminação mista e as persianas cerradas em seus escritórios, mesmo com bom desempenho quanto ao aproveitamento da luz do dia das salas. O presente trabalho emprega a simulação computacional para explorar uma série de variáveis relacionadas à iluminação que poderiam explicar aquela opção de controle da luz. Através dos resultados de simulações computacionais com o Daysim e o Radiance foram derivadas e analisadas a Disponibilidade de Luz do Dia Espacial (sDA), a Exposição Anual à Luz do Sol (ASE), a Probabilidade de Ofuscamento por Luz do Dia (DGP) e os indicadores de modelagem da luz: relação entre iluminâncias vetorial e escalar em função da altura do vetor de iluminância e relação entre as iluminâncias cilíndrica e horizontal. A relação entre as iluminâncias cilíndrica e horizontal apresenta o melhor desempenho, explicando a preferência pelas luminárias ligadas com persianas fechadas em 33% do período anual de trabalho e pelas luminárias acesas com persianas abertas em 49% daquele período.

Palavras-chave: iluminação natural, escritório, simulação computacional.

ABSTRACT

Workplaces with good daylighting allow the adequate performance of visual activities and energy saving, as well as provide users with visual comfort and a set of physiological and psychological benefits, such as perception of the diurnal cycle, regulation of the circadian cycle and sense of vitality. However, users do not always take action to maximize its use. Results from a previous work in individual professors' offices of two buildings at UNESP – Bauru (SP) campus show the prevailing preference for mix lighting and closed blinds, despite of the good rooms' performance for daylighting. This paper uses computational simulation to explore a set of variables related to lighting that could explain that light control preference. The Spatial Daylight Availability (sDA), Annual Sunlight Exposure (ASE), Daylight Glare Probability (DGP) and the modeling light indicators related: vector to scalar illuminance ratio x illuminance vector altitude angle and cylindrical to horizontal illuminance ratio were derived from the data of a case study simulated with Daysim and Radiance and analyzed. The cylindrical to horizontal illuminance ratio gave the better performance, explaining the preference by the luminaires turned on and the blinds down in 33% of the annual work time and by the luminaires turned on and the blinds open in 49% of that time.

Keywords: daylighting, office, computing simulation.

1. INTRODUÇÃO

Ambientes de trabalho bem iluminados com a luz do dia tornam possível o bom desempenho das atividades visuais e proporcionam o conforto visual dos usuários (HESCHONG, 2003). Além disso, proporcionam uma série de outros benefícios fisiológicos e psicológicos, como percepção do ciclo diurno, regulação do ciclo circadiano e sensação de vitalidade, entre outros (BOUBEKRI, 2008; BOYCE et al., 2003; EDWARDS; TORCELLINI, 2002; SMOLDERS, 2013; VEITCH, 2001a). Finalmente, mas não menos importante, economizam energia (MARDALJEVIC et al., 2009; RUCK et al., 2000).

No entanto, a bibliografia vem mostrando que, quando o usuário tem para si o controle da iluminação, ele busca seu conforto visual, mas nem sempre suas decisões são racionais no sentido de maximizar o uso da luz natural. Baker; Steemers (2014) apresentam o caso mais comum entre ingleses, de ligar as luminárias ao chegar ao trabalho e somente desligá-las ao final do expediente. Uma série de trabalhos apresenta resultados convergentes: quando a sala é ocupada por uma pessoa, as persianas ficam fixas durante grandes períodos de tempo em posições que impedem a entrada da luz solar direta ou de radiação térmica apenas em períodos críticos (BOYCE et al., 2006; CORREIA DA SILVA et al., 2013). Esse comportamento do usuário acaba tendo um grande peso no consumo de energia de iluminação (GONÇALVES et al., 2013), uma vez que deixa de aproveitar a luz do dia. Na contramão desses resultados, Reinhart (2004) propôs o modelo Lightswitch-2002, usado pelo programa Daysim, segundo o qual o usuário é racional e fecha as persianas para evitar a radiação solar direta, que causa aquecimento excessivo e ofuscamento, e abre-as cessado o incômodo para melhor aproveitar a luz do dia. Van Den Wymelenberg (2012) apresenta uma extensa revisão bibliográfica sobre o controle da luz natural pelos usuários através de persianas, mas os resultados são tão inconclusivos, mostrando o alto grau de subjetividade envolvido na ação, que o levam a propor uma agenda de estudos sobre o tema (VAN DEN WYMELENBERG, 2014).

O ponto de partida para este trabalho foi uma pesquisa preliminar realizada em 2013 com a aplicação de questionários a 28 docentes dos departamentos de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo (DAUP) e Design (DESIGN) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo do campus de Bauru da Unesp – Universidade Estadual Paulista, cujos resultados mostraram que 31% dos respondentes do DAUP e 50% do DESIGN usam somente a luz do dia em suas salas; o restante prefere a iluminação mista combinada com persianas fechadas com as lâminas em posições diversas. Nenhuma correlação significativa foi encontrada entre dessa preferência com possíveis causas apontadas nas demais questões (dentre as quais: orientação da sala e do posto de trabalho, ofuscamento, privacidade e proteção térmica). Dessa forma, o presente trabalho parte do estudo desse caso para explorar possibilidades de explicação do comportamento do usuário de escritórios individuais no controle da iluminação de seu espaço de trabalho através de indicadores de desempenho do aproveitamento da luz do dia e de conforto visual obtidos por simulação computacional.

Um estudo completo sobre a qualidade da luz do dia pode ser bastante complexo, porque deve envolver outros condicionantes além de variáveis fotométricas, como estados de humor e de fadiga e a vista exterior proporcionada pelas aberturas (NEWSHAM et al., 2009; TUAYCHAROEN; TREGENZA, 2005; VEITCH, 2001a, 2001b). Além disso, Boyce et al. (2006) e Heschong (2012) apontam para uma grande variação nas preferências de iluminação para proporcionar conforto visual; assim, dificilmente uma única variável explicará adequadamente essas configurações.

Apesar disso e de diversas críticas (BOYCE, 1996; CUTTLE, 2010), a iluminância sobre o plano de trabalho – predominantemente horizontal em escritórios – é correntemente adotada como parâmetro para compor índices que possibilitam a avaliação do desempenho visual de tarefas (HESCHONG, 2012; NABIL; MARDALJEVIC, 2005). Por outro lado, como o conforto visual é relacionado com a maneira como a luz incide nos olhos, os índices a ele relacionados têm por base a distribuição e de luminâncias (WIENOLD; CHRISTOFFERSEN, 2006). Porém, como é muito mais fácil medir ou calcular iluminâncias do que luminâncias, a primeira grandeza tem sido preferencialmente usada para compor índices de distribuição da luz do dia em geral, mesmo para descrever as condições de conforto visual (CUTTLE, 2008; WIENOLD, 2009; HESCHONG, 2012; MARDALJEVIC et al., 2012; IES DAYLIGHT METRICS COMMITTEE, 2012; LICHT.DE, 2012).

O Fator de Luz do Dia (FLD) foi um dos primeiros índices de luz natural, baseado numa distribuição de luz em céu totalmente encoberto definida pela CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*). Devido à grande variabilidade de condições de céu em situações reais, trabalhos recentes usam índices dinâmicos de distribuição espacial da luz do dia baseadas no clima (*climate-based daylighting modeling*, CBDM) (REINHART et al., 2006), como a Autonomia de Luz do Dia (*Daylight Autonomy*, DA) (REINHART, 2001) e a Iluminância da Luz do Dia Útil (*Useful Daylight Illuminance*, UDI) (NABIL; MARDALJEVIC, 2005), entre outras. Esses índices são relacionados à iluminância horizontal em pontos no interior da sala em estudo e são calculados a partir de arquivos climáticos padronizados; assim, eles expressam a variabilidade local

temporal da luz do dia. Os cálculos envolvem a divisão céu (TREGENZA, 1987) para gerar coeficientes de luz do dia (BOURGEOIS et al., 2007); estes são então associados aos dados do arquivo climático local para gerar os parâmetros da luz do dia sobre os pontos de análise. Dos conceitos dessas grandezas e apoiada em trabalhos de campo (HESCHONG, 2012) a IES (*Illuminating Engineering Society*) derivou dois índices qualificadores gerais da sala de trabalho quanto ao aproveitamento da luz do dia: a Disponibilidade de Luz do Dia Espacial (*Spatial Daylight Availability*, sDA e a Exposição Anual à Luz do Sol (*Annual Sunlight Exposure*, ASE), presentes no LM-83-12 (IES DAYLIGHT METRICS COMMITTEE, 2012).

Outras categorias de grandezas estão associadas com a direcionalidade da luz, sua distribuição espacial e a maneira como ela incide nos olhos do usuário. Elas são compostas pelos índices de ofuscamento (WIENOLD; CHRISTOFFERSEN, 2006) e pelos definidores de modelagem espacial da luz (CUTTLE, 2008; LICHT.DE, 2012).

O critério do IES LM-83-12 para ocorrência de ofuscamento, definido pelo ASE, é a incidência de luz solar direta num ponto qualquer do plano de trabalho da sala, seja ele real ou virtual (um possível local para um posto potencial do plano de trabalho seja ele ocupado por uma pessoa ou não). Por outro lado, o conceito de ofuscamento é limitado, pois é válido para apenas uma direção de eixo visual; qualquer mudança dele implica num novo cálculo. É possível calcular índices de ofuscamento para um conjunto de orientações para compensar essa limitação, como a “zona adaptativa”, uma faixa lateral de $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo visual (JAKUBIEC; REINHART, 2012). Há vários índices de ofuscamento, mas a Probabilidade de Ofuscamento por Luz do Dia (*Daylight Glare Probability*, DGP) (WIENOLD; CHRISTOFFERSEN, 2006) foi considerado o mais robusto para a análise de ofuscamento pela luz do dia no estudo realizado por Jakubiec; Reinhart (2012). O cálculo original do DGP é efetuado a partir da distribuição de luminâncias e da iluminância vertical e usa uma imagem HDR (*High Dynamic Range*) da cena visualizada como referência. Wienold (2009) propôs duas simplificações no cálculo do DGP: correlação do DGP com a iluminância vertical, tornando-o independente da distribuição de luminâncias (válido para fontes luminosas extensas, como janelas, tornando similar ao critério adotado pela ASE); redução da resolução da imagem HDR de referência como forma de reduzir o tempo de cálculo e viabilizar a “zona adaptativa” sem perda de precisão significativa (algoritmo usado no Daysim). No mesmo trabalho, Wienold propôs quatro faixas de valores para o DGP: imperceptível ($DGP \leq 0,35$), perceptível ($0,35 < DGP \leq 0,40$), perturbador ($0,40 < DGP \leq 0,45$) e intolerável ($DGP > 0,45$). Mardaljevic et al. (2012) mostraram num estudo preliminar que o ofuscamento pode ser estimado através da UDI medido no plano de visão, uma vez que existe uma boa correlação entre ele e a DGP; no entanto, o trabalho não teve prosseguimento.

Embora a ASE e a proposta do uso do UDI por Mardaljevic et al. (2012) sejam relacionadas ao conforto visual, elas usam a iluminância sobre um plano de trabalho horizontal e não a iluminância vertical, como proposto por Wienold (2009), ou mesmo distribuições de luminâncias.

Numa outra abordagem, em princípio orientada à iluminação artificial, Cuttle (2008, 2010) associa o conforto visual à ambiência produzida pela iluminação, a qual depende do ângulo vertical de incidência da luz (α) e da relação entre o módulo da iluminância vetorial e a iluminância escalar (E_v/E_s); em outras palavras, depende da modelagem espacial promovida pela luz. Nesse caso, são consideradas as iluminâncias incidentes de todas as direções no ponto correspondente aos olhos do usuário. O autor aponta que o intervalo preferido para a E_v/E_s é de 1,2 a 1,8 numa escala de 0,0 a 4,0, e o preferido para α é de 15° a 45° . No entanto, tal qual o DGP, não há limites espaciais ou temporais para qualificar a iluminação natural para essas grandezas e classificar as salas quanto à qualidade da iluminação. Pereira; Pereira (2004) mostraram, através de um estudo de caso, a importância da modelagem espacial satisfação com o ambiente luminoso. Na mesma linha, a DIN EN 12464-1:2011 – “Lighting of work places - Part 1: Indoor work places” define como indicador da modelagem espacial da luz a relação entre a iluminância cilíndrica e a iluminância no plano de trabalho (E_{cyl}/E_h) no intervalo de 0,3 a 0,6 para uma boa modelagem (LICHT.DE, 2012).

Na bibliografia recente a simulação computacional é realizada normalmente através do Radiance Lighting Simulation System (ou simplesmente Radiance) (WARD, 1994), ou outros que têm por base seus algoritmos, como o Daysim (REINHART, 2001). Ambos os programas foram validados através de diversos estudos (GRYNBERG, 1989; MARDALJEVIC, 1999; REINHART; WALKENHORST, 2001). Melhorias no Radiance (SAXENA et al., 2010) tornaram possível o cálculo da contribuição de várias parcelas de luz (luz solar direta, luz difusa da abóbada, e reflexões direta e difusa) ao longo do ano, tal qual o Daysim.

O Daysim utiliza por padrão uma grade horizontal de pontos que representa o plano de trabalho para calcular a distribuição de iluminâncias produzida pela iluminação natural. No entanto, o algoritmo utilizado, oriundo do Radiance (REINHART, 2001), possibilita a orientação dos sensores de iluminância dos pontos da grade em qualquer direção. Assim, cada ponto pode ser, por exemplo, um medidor de iluminância cúbico

com sensores seis direções, os quais, posicionados na cabeça dos usuários, podem ser usados para medir as iluminâncias usadas na modelagem espacial da luz (conforme CUTTLE, 2008 e DUFF, 2012).

Os estudos acima relacionados são omissos (ao menos em relação a dados empíricos; ficam restritos a hipóteses) quanto ao impacto da temperatura de cor da luz do dia e da luz elétrica no conforto visual. Porém, tanto a partir do gráfico de Kruithof (CUTTLE, 2008) como a partir de resultados de pesquisas mais recentes

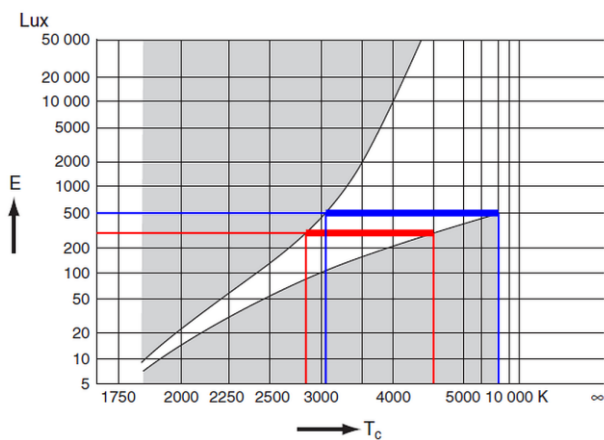


Figura 1 – Gráfico de Kruithof mostrando as faixas de temperatura de cor consideradas agradáveis para 300 lux (→) e 500 lux (→). Adaptado de Cuttle (2008).

envolvendo satisfação, iluminância e temperatura de cor (VIÉNOT et al., 2009; ZHAI et al., 2014), apresentam-se evidências da preferência por baixas temperaturas de cor em iluminação de interiores. Tomando como referência o gráfico de Kruithof, a faixa de temperaturas de cor preferida para iluminâncias de 500 lux (recomendada pela NBR ISO/CIE 8995-1:2013 – “Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior” para escritórios) varia de aproximadamente 3000 a 10000 K (o que compreende, na porção superior da gama, a temperaturas de cor proporcionadas pela abóbada celeste), mas para 300 lux (proposto pelo IES LM-83-12 como limite mínimo para o uso da luz do dia) essa faixa cai para aproximadamente de 2700 a 4500 K, obtida na maior parte da gama somente com a luz do dia crepuscular ou com a iluminação elétrica, mas não com a luz da abóbada celeste (Figura 1).

2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo explicar a preferência, por parte de usuários de escritórios ocupados por uma ou duas pessoas, pela iluminação mista (natural e elétrica) e persianas fechadas no decorrer do período de trabalho diurno, através de variáveis de desempenho de aproveitamento da luz do dia e de conforto visual.

3. MÉTODO

O método empregado no desenvolvimento do trabalho foi o tratamento de dados resultantes de simulação computacional da iluminação natural e elétrica realizado em um estudo de caso para verificar se os valores de variáveis de desempenho de aproveitamento da luz do dia e de conforto visual correspondem aos limites de preferência indicados pela bibliografia especializada. Pressupôs-se, portanto, que faixas de bom desempenho ou de preferências desses índices sejam representativas da preferência dos indivíduos do estudo.

Foram estudadas duas salas de docentes dos prédios dos departamentos de Design (DESIGN) e de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo (DAUP) da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo do campus de Bauru da UNESP – Universidade Estadual Paulista, ambos com a mesma concepção arquitetônica. Uma das salas fica no pavimento superior da fachada NNE do prédio do DESIGN, correspondente à situação de maior exposição à abóbada celeste e à luz solar direta, e outra no pavimento inferior da fachada SSO do prédio do DAUP, correspondente à menor exposição à abóbada e à luz solar direta (Figura 2); dessa forma, as demais salas devem ter desempenhos intermediários às estudadas em relação ao aproveitamento da luz do dia.



Figura 2 – Prédios estudados; em primeiro plano a fachada NNE do DESIGN, com destaque para a sala simulada; em segundo plano o prédio do DAUP.

As salas dos docentes têm 2,95 x 3,85 x 2,90 m e são ocupadas geralmente por uma pessoa, em alguns casos por duas. Todas têm duas janelas: na fachada, com 2,85 x 1,15 m, e na parede do fundo, sobre a porta, com 2,85 x 0,50 m, todas do tipo basculante com vidro comum. A janela da fachada é dividida verticalmente por uma prateleira de luz externa a 2,10 m e tem persianas operadas manualmente com lâminas horizontais de alumínio escovado com 2,5 cm de largura. Devido ao uso de mobiliário padrão, são usados basicamente dois arranjos de mobiliário, os quais são espelhados em função da posição da porta. As salas são equipadas com quatro luminárias com corta luz, cada qual com duas lâmpadas fluorescentes tubulares de 32 W, temperatura de cor de 4000K e IRC de 60%.

A característica climática principal da localidade é a amplitude térmica diária relativamente elevada (13 a 15 °C) ao longo do ano, com temperaturas máximas chegando a 30 °C e manhãs amenas. Dessa forma, raramente os ocupantes dos prédios usam a radiação solar para se aquecerem; ao contrário, eles evitam a exposição ao sol dos seus locais de trabalho o ano todo.

Os estudos preliminares para o projeto dos prédios dos departamentos DESIGN e DAUP foram realizados no início dos anos 2000. Na época foram feitos estudos com cartas solares e simulações com o programa Radiance para maximizar as condições de conforto ambiental, em particular o sombreamento das fachadas, o aproveitamento da luz do dia e a ventilação cruzada.

As simulações desta pesquisa foram realizadas com os programas Daysim e Radiance. A modelagem das salas, assim como a configuração do Daysim, foi feita de acordo com as diretrizes do IES LM-83-12. Em cada simulação foram consideradas, para cada sala:

- Uma malha a 2,54 cm acima do plano das mesas (0,75 m) com 4 x 6 células de 0,60 x 0,55 m e afastamento das laterais da sala de 0,275 m, ficando os pontos de simulação de iluminâncias horizontais dispostos nos centros dessas células (Figura 3);
- Arranjos físicos típicos para um e para dois ocupantes e seus simétricos (4 arranjos por sala);
- Configuração de possibilidades de posicionamento das persianas em três posições: totalmente abertas, fechadas com as lâminas horizontais (0°) e fechadas com as lâminas a 45° de inclinação para o lado externo (as mais frequentes no estudo preliminar, levantadas a partir de fotografias). As persianas foram geradas através do aplicativo genblinds do Radiance;
- Pontos para simulações de DGP em “zona adaptativa” a 1,2 m do piso (altura do plano de visão de uma pessoa sentada, conforme LICHT.DE, 2012) em duas orientações para cada usuário (olhando horizontalmente nas direções indicadas na Figura 3); nesse caso, para cada usuário é coberta uma área horizontal de eixos de visão de 180°;
- Pontos para simulações de iluminâncias em planos com seis direções (x, y, z, -x, -y e -z, conforme CUTTLE, 2015 e DUFF, 2012) a 1,2 m do piso (altura do plano de visão de uma pessoa sentada) para cada usuário, para posterior cálculo das variáveis de modelagem (E_v/E_s , α e E_{cyl}/E_h).

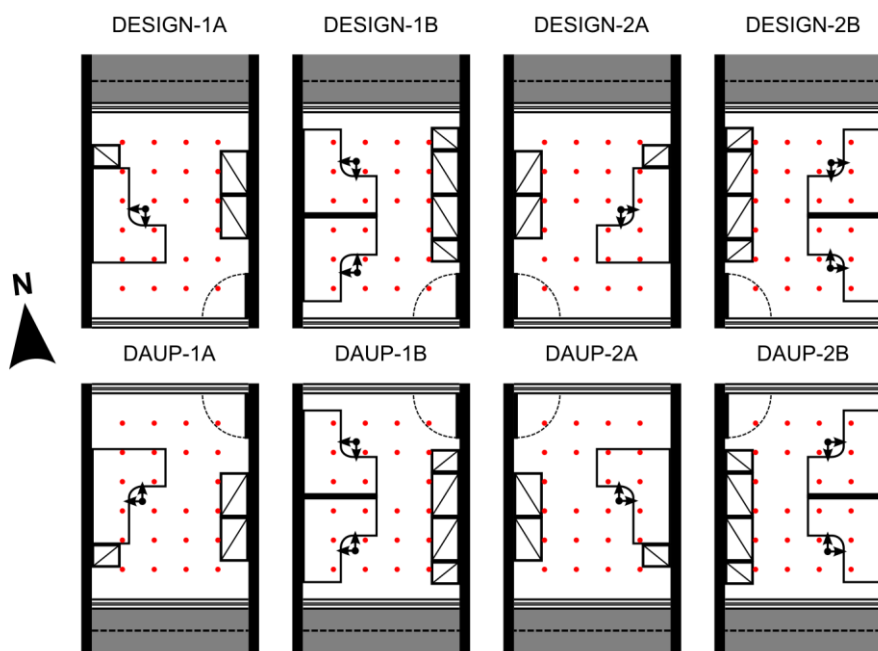


Figura 3 – Arranjos físicos das salas estudadas, com a grade de pontos para simulação da iluminância horizontal (●) e os postos de trabalho (●), nos quais foram simuladas as variáveis de modelagem, com as respectivas vistas para a determinação do DGP.

A vegetação arbórea fechada dos bosques de cerrado que circunda os dois prédios foi representada pelos planos verticais de seus limites, com altura de 6,0 m (média das alturas máximas das árvores).

As refletâncias das superfícies foram determinadas pela comparação de suas respectivas luminâncias com a de uma folha de papel usada como referência (refletância = 0,87, conforme DORNELLES, 2008), sendo os resultados principais expostos na Tabela 1. A refletância das persianas (0,7) foi obtida do *Radiance Colour Picker* (http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/colour_picker.shtml).

Tabela 1 – Refletâncias medidas das superfícies mais relevantes para o estudo

Superfície	Refletância
Teto e paredes	0,73
Piso	0,27
Mesas e armários	0,26
Concreto	0,24
Vegetação (árvores e grama)	0,20
Asfalto	0,08

A simulação da iluminação elétrica foi realizada através do Radiance.

Os resultados das simulações do Daysim foram tratados numericamente para gerar valores de sAD, ASE e DGP. Em conjunto com os resultados das simulações feitas com o Radiance, foram calculados E_v/E_s , α e E_{cyl}/E_h . Os valores de sAD e de ASE foram calculados segundo os procedimentos do LM-83-12 e as variáveis de modelagem segundo os procedimentos expostos por Cuttle (2008) e Duff (2012).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados das simulações com o Daysim e com o Radiance geraram valores para cálculos de ASE e de sAD das salas e para distribuição de anual de DGP e modelagem da iluminação nos postos de trabalho.

4.1. ASE e sDA

As simulações com o Daysim geraram como resultados valores de $ASE_{1000, 250h} = 0\%$ para todas as salas, ou seja, não há incidência de iluminação solar direta significativa no plano de trabalho e, por conseguinte, não deveria ocorrer ofuscamento. Por outro lado, a $sDA_{300, 50\%}$ varia com a orientação e a localização das salas e com seus arranjos físicos internos; assim, somente com a ocupação individual a sala do DESIGN atinge a “suficiência de luz do dia preferida” do LM-83-12 ($sDA_{300, 50\%} \geq 70\%$); nos demais casos, o aproveitamento da luz do dia é apenas “nominalmente aceitável” ($50\% \leq sDA_{300, 50\%} < 70\%$) (Tabela 2). Cabe salientar que para atingir o valor de $ASE_{1000, 250h} = 0\%$, os resultados do Daysim indicaram a necessidade de cerrar as persianas durante 6% do período anual de trabalho com as lâminas a 0° e 1 % do período com as lâminas a 45° (opções de fechamento e de inclinações configuradas como entradas do programa) para evitar a entrada de luz solar direta na sala do DESIGN (em todos os arranjos físicos); na sala do DAUP elas poderiam ser mantidas abertas durante 100% do período do trabalho.

Tabela 2 – Disponibilidade de Luz do Dia Espacial ($sDA_{300, 50\%}$) das salas estudadas

Prédio	DESIGN				DAUP			
	1A	1B	2A	2B	1A	1B	2A	2B
SDA_{300,50%} (%)	70	70	62	58	54	50	50	54

Assim, a $sDA_{300, 50\%}$ explica em parte a preferência pela iluminação mista na maioria dos arranjos das salas, já que a iluminação elétrica é necessária em aproximadamente 30% a 50% do período de trabalho ao longo do ano (considerando-se que o desempenho das demais salas seja intermediário entre os das salas aqui estudadas). No entanto, a $ASE_{1000, 250h}$ por si só é insuficiente para explicar a preferência pelas persianas cerradas, já que a princípio não ocorre ofuscamento e essa ação piora o aproveitamento da iluminação natural. Conclui-se, portanto, a exemplo da bibliografia, que os usuários do presente estudo não têm o comportamento racional do modelo de operação de dispositivos de sombreamento adotado pelo Daysim.

4.2. DGP

Convalidando o valor da ASE, os valores de DGP encontrados situam-se todos na faixa de “ofuscamento imperceptível” (Figura 4), invalidando a necessidade de fechar as persianas ou ligar luminárias para evitar ofuscamento. Os maiores valores de DGP ocorrem para pessoas que ocupam o fundo da sala do DESIGN

nos arranjos para duas pessoas (2A e 2B, 18% dos casos orientados para NNE), mas continuam na mesma faixa.

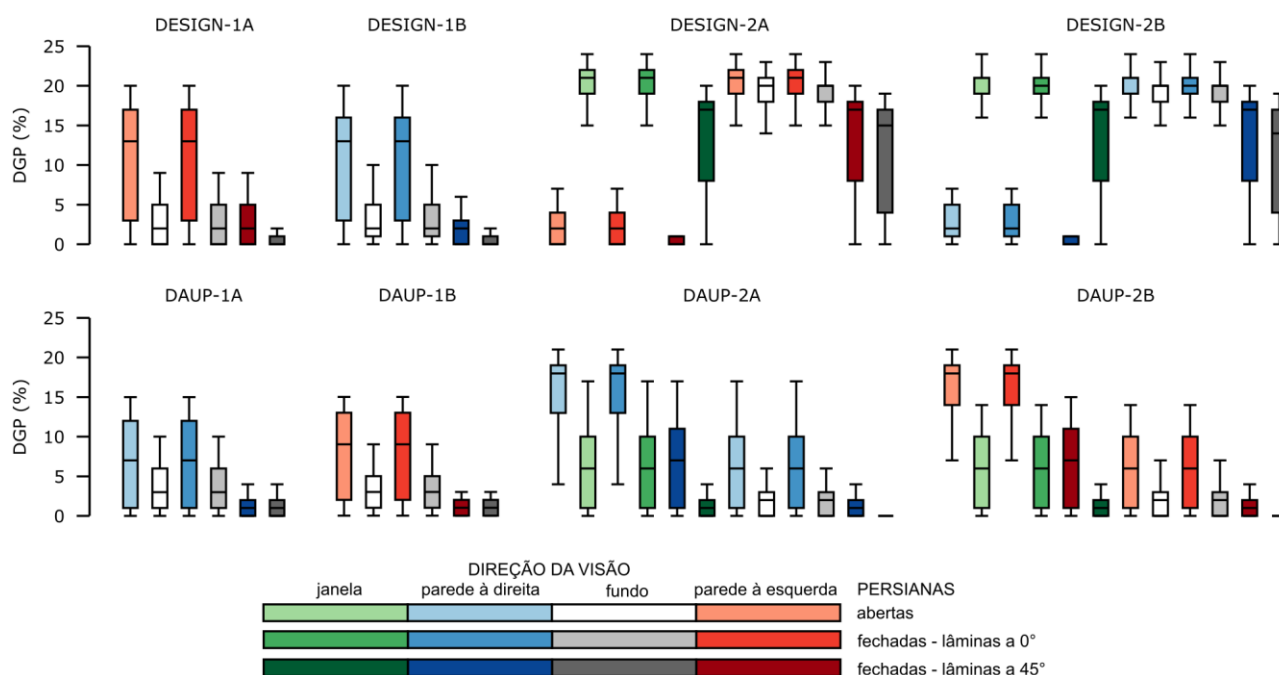


Figura 4 – Distribuição dos valores de DGP nas salas estudadas em função dos arranjos físicos internos e das posições de persianas.

4.3. Modelagem

A modelagem da luz através da relação E_v/E_s em função de α mostra resultados mais coerentes, embora não conclusivos, sobre a preferência dos usuários pelo uso da iluminação mista e fechamento das persianas. Observa-se na Figura 5 que nas duas salas e independentemente do arranjo físico a persiana totalmente aberta causa valores de α bastante baixos (abaixo de 15°) e valores de E_v/E_s elevados. O acionamento das lâmpadas não altera significativamente E_v/E_s , mas o valor de α chega a aumentar excessivamente porque as luminárias têm corta-luzes, orientando o fluxo luminoso para baixo apenas: para a iluminação elétrica noturna, E_v/E_s médio = 2,9 (desvio padrão = 0,3) e α médio = $67,1^\circ$ (desvio padrão = $2,9^\circ$), ambos os valores acima dos preferenciais ($1,2 \leq E_v/E_s \leq 1,8$ e $15^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$). O fechamento das persianas diminui o valor de E_v/E_s devido à redução da luminosidade do exterior e aumenta o valor de α pela reflexão da luz do dia que incide nas lâminas para o teto; nesse caso, as altitudes são maiores para as lâminas a 0° . As salas ocupadas por uma pessoa apresentam modelagem espacial progressivamente melhor (pontos na faixa de preferência ou próximas a ela) quando as persianas são fechadas e com as lâmpadas acesas, obtendo o melhor desempenho quando as persianas são fechadas com as lâminas a 0° . Desempenho semelhante ocorre nos arranjos para duas pessoas para os pontos próximos à janela da fachada, mas o desempenho para os pontos no fundo da sala é um pouco pior. Do ponto de vista unicamente da modelagem, os melhores desempenhos são obtido na sala do DAUP, principalmente nas ocupadas por duas pessoas, nas posições próximas à janela, com as persianas fechadas e suas lâminas a 45° ; no entanto, infelizmente, nessa situação a luz do dia é insuficiente. Além disso, essas variáveis explicam somente 6% dos casos de ambas as salas (11% na sala do DAUP) durante o período anual de trabalho, com a luz do dia e as persianas baixadas com as lâminas a 0° .

A relação de E_{cyl}/E_h média para a iluminação elétrica noturna das salas é de 0,22, abaixo da recomendada pela DIN EN-12464-1:2011 (LICHT.DE, 2012) ($0,3 \leq E_{cyl}/E_h \leq 0,6$). Ela independe da condição das persianas (desvio-padrão = 0,02). Seu baixo valor, mesmo com as altas refletâncias das paredes, tem a mesma explicação apontada acima para E_v/E_s médio da iluminação noturna, ou seja, as luminárias com corta-luz. Por outro lado, a luz do dia gera elevados valores de E_{cyl}/E_h (devido aos elevados valores de iluminâncias verticais), os quais são minimizados com o acendimento da luz elétrica (Figura 6). A iluminação composta pela luz do dia + luz elétrica + persianas abertas resulta na maior frequência de índices na faixa preferencial (49% dos casos, distribuídos igualmente pelas duas salas), seguida pela luz do dia + luz elétrica + persianas fechadas com lâminas a 0° (33% dos casos, sendo 34% no DESIGN e 32% no DAUP).

Dessa forma, dentre as variáveis estudadas, a relação E_{cyl}/E_h é a que melhor explica a preferência dos usuários pela iluminação diurna mista com as persianas baixadas.

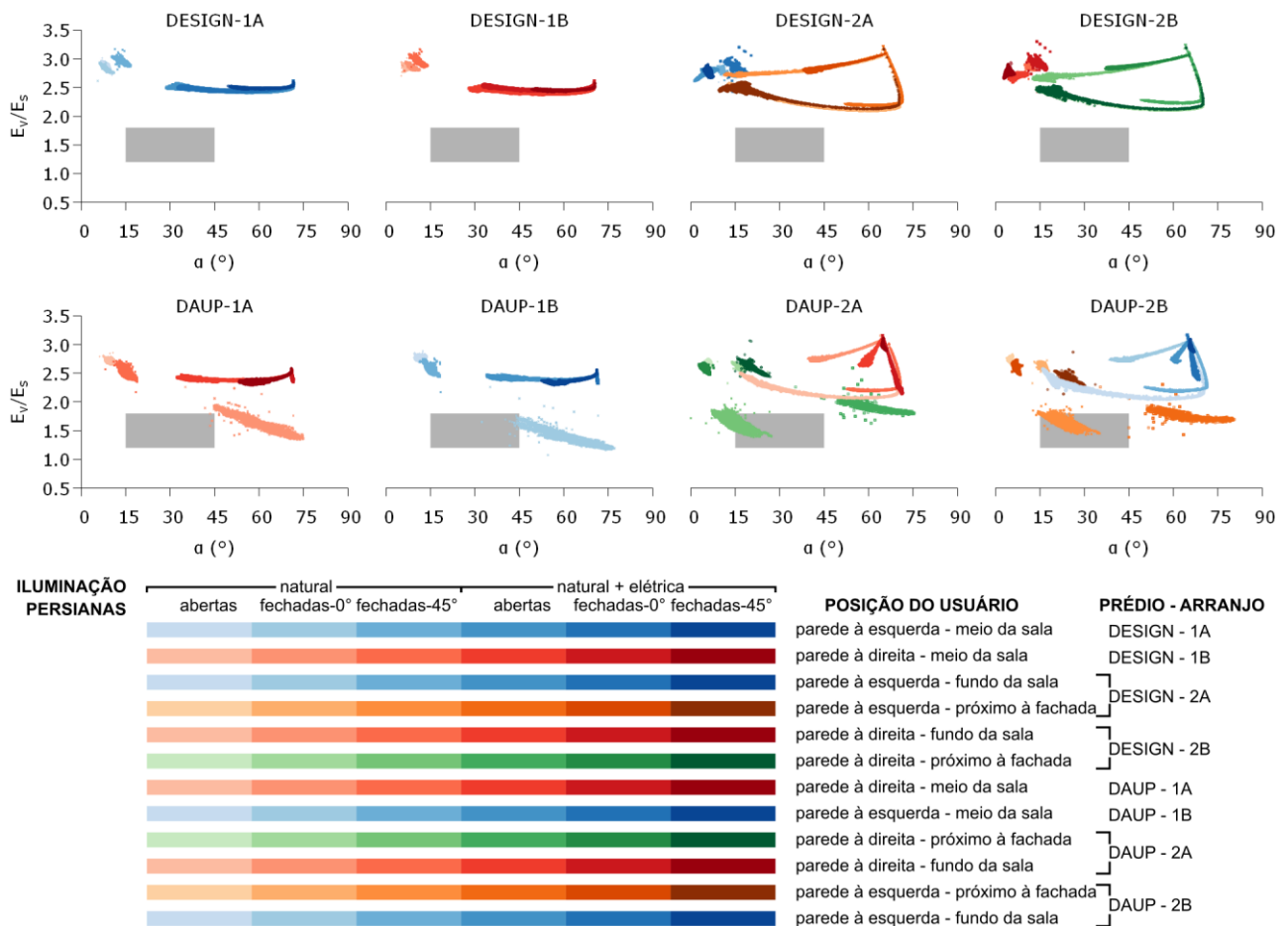


Figura 5 – Distribuição anual de E_v/E_s em função da altitude da iluminância em relação aos limites recomendados por Cuttle (2008) (área cinza) para as salas estudadas.

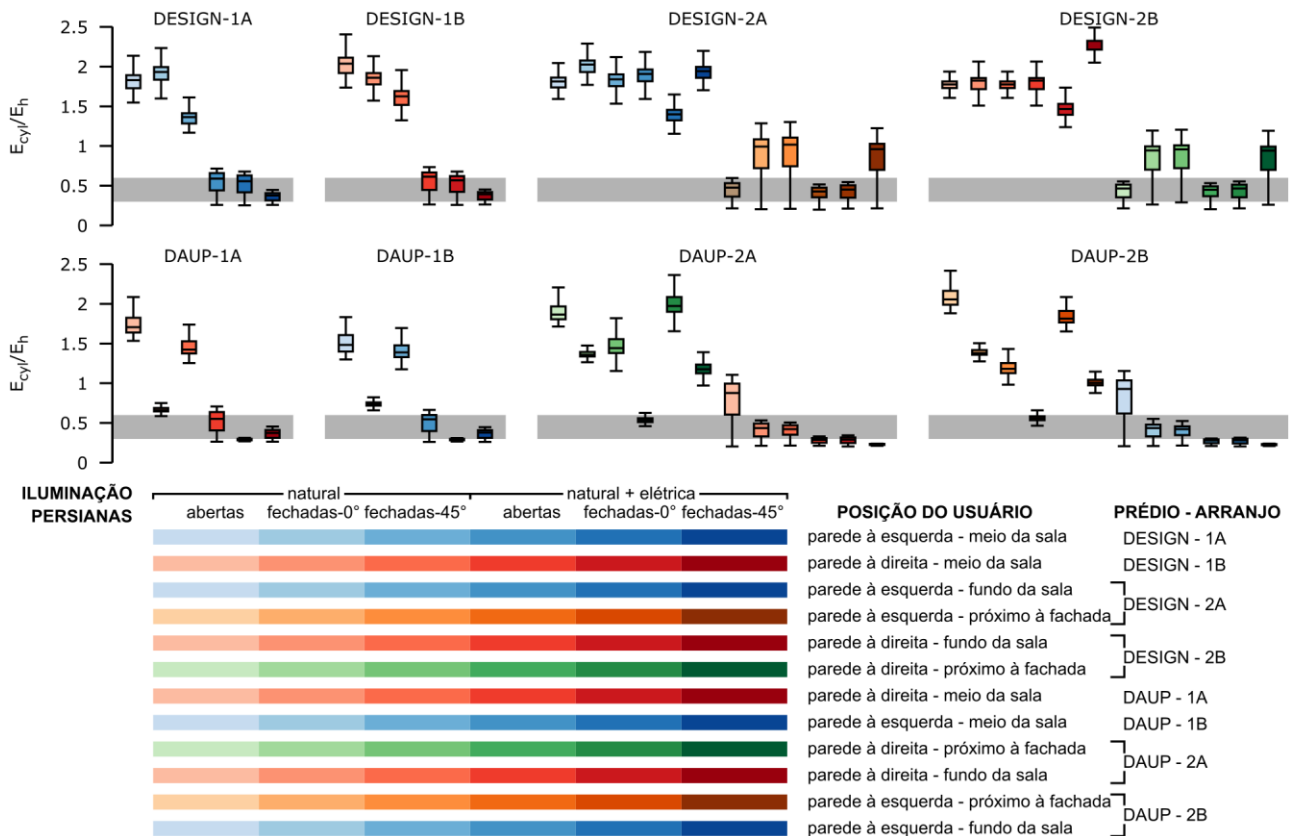


Figura 6 – Boxplot da distribuição anual de E_{cyl}/E_h em relação aos limites recomendados pela DIN EN-12464-1:2011 (área cinza) para as salas estudadas.

5. CONCLUSÕES

A análise da iluminação de espaços de trabalho é permeada por um alto grau de subjetividade no que diz respeito às preferências de hábitos do usuário quanto ao seu controle. Este trabalho testou um conjunto de indicadores de desempenho do aproveitamento da luz do dia e de conforto visual, gerados por simulação computacional em um estudo de caso, para explicar a preferência de parte expressiva dos usuários do local analisado pela iluminação mista e uso de persianas baixadas durante o período diurno de trabalho.

Os valores de sDA indicaram aproveitamento da luz do dia pelas salas de razoável a satisfatório e os de ASE ausência de ocorrência de ofuscamento; no entanto, a simulação que os gerou pressupõe um comportamento racional do usuário no sentido de maximizar o uso da iluminação natural, o que não ocorre no caso estudado. O DGP fornece resultados compatíveis com o ASE, já que não existem fontes pontuais de ofuscamento. Assim, nenhum desses índices explica representativamente a necessidade do uso de iluminação mista e de persianas baixadas.

A iluminação mista e, em alguns casos, com persianas baixadas, gera melhor modelagem, resultando em frequências relativamente elevadas de $E_s/E_v \times \alpha$ e E_{cyl}/E_h nos intervalos recomendados pela bibliografia. Em especial a frequência de E_{cyl}/E_h na faixa recomendada pela bibliografia é semelhante à da preferência dos indivíduos do estudo de caso por iluminação mista com persianas cerradas. Dessa forma, recomenda-se a ampliação dos estudos para validar esse índice como representativo dessa preferência de controle de iluminação em outros casos.

Finalmente, considerando-se que os estudos que levaram à elaboração do gráfico de Kruithof usaram apenas iluminação elétrica (originalmente com lâmpadas incandescentes e fluorescentes), sugere-se a continuidade do trabalho através da investigação do efeito da temperatura de cor da luz sobre a preferência dos usuários comparando-se as diversas temperaturas de cor proporcionadas pela luz do dia, além da luz elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER, N.; STEEMERS, K. **Daylight design of buildings: a handbook for architects and engineers**. London: Routledge, 2014.
- BOUBEKRI, M. **Daylight, architecture and health: building design strategies**. Oxford, UK; Burlington (MA): Architectural Press, 2008.
- BOURGEOIS, D.; REINHART, C. F.; WARD, G. Standard daylight coefficient model for dynamic daylighting simulations. **Building Research & Information**, v. 36, n. 1, p. 68–82, 2007.
- BOYCE, P.; HUNTER, C.; HOWLETT, O. **The benefits of daylight through windows**. New York: Lighting Research Center, 2003.
- BOYCE, P. R. Illuminance selection based on visual performance – and other fairy stories. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, v. 25, n. 2, p. 41–49, 1996.
- BOYCE, P. R.; VEITCH, J. A.; NEWSHAM, G. R.; et al. Occupant use of switching and dimming controls in offices. **Lighting Research and Technology**, v. 38, n. 4, p. 358–376, 2006.
- CORREIA DA SILVA, P.; LEAL, V.; ANDERSEN, M. Occupants interaction with electric lighting and shading systems in real single-occupied offices: results from a monitoring campaign. **Building and Environment**, v. 64, p. 152–168, 2013.
- CUTTLE, C. **Lighting by design**. 2nd ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2008.
- CUTTLE, C. Towards the third stage of the lighting profession. **Lighting Research and Technology**, v. 42, n. 1, p. 73–93, 2010.
- VAN DEN WYMELENBERG, K. G. Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 51, p. 165–176, 2012.
- VAN DEN WYMELENBERG, K. G. Visual comfort, discomfort glare, and occupant fenestration control: developing a research agenda. **LEUKOS**, v. 10, n. 4, p. 207–221, 2014.
- DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. Tese de doutorado, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- DUFF, J. The 2012 SLL Code for lighting: the impact on design and commissioning. **Journal of Sustainable Engineering Design**, v. 1, n. 2, 2012.
- EDWARDS, L.; TORCELLINI, P. **A literature review of the effects of natural light on building occupants**. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- GONÇALVES, C. C.; SOUSA, R. G. G.; LOURA, R. M. A influência dos usuários na eficiência energética de uma edificação - estudo de caso do Laboratório de Conforto da UFMG. Anais do II CONINTER. **Anais...** . p.1–15. Belo Horizonte, 2013.
- GRYNBERG, A. **Validation of RADIANCE**. Berkeley: Lawrence Berkeley Laboratory, 1989.
- HESCHONG, L. **Windows and offices: a study of office worker performance and the indoor environment**. Technical Report, Fair Oaks, California: California Energy Commission, 2003.
- HESCHONG, L. **Daylight metrics**. Final Project Report, Sacramento, CA: California Energy Commission, 2012.
- IES DAYLIGHT METRICS COMMITTEE. Approved method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). Illuminating Engineering Society of North America, 2012.
- JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. The “adaptive zone” – a concept for assessing discomfort glare throughout daylit spaces. **Lighting Research and Technology**, v. 44, n. 2, p. 149–170, 2012.
- LICHT.DE. **Guide to DIN EN 12464-1: Lighting of work places - Part 1: Indoor work places**. 2° ed. Frankfurt: Fördergemeinschaft Gutes Licht, 2012.

- MARDALJEVIC, J. **Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients**. PhD. Thesis, Leicester: De Montfort University, 1999.
- MARDALJEVIC, J.; ANDERSEN, M.; ROY, N.; CHRISTOFFERSEN, J. Daylight metrics: is there a relation between Useful Daylight Illuminance and Daylight Glare Probability? IBPSA 2012. *Anais...* . p.189–196. Loughborough, UK: IBPSA, 2012.
- MARDALJEVIC, J.; HESCHONG, L.; LEE, E. Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research and Technology*, v. 41, n. 3, p. 261–283, 2009.
- NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology*, v. 37, n. 1, p. 41–57, 2005.
- NEWSHAM, G.; BRAND, J.; DONNELLY, C.; et al. Linking indoor environment conditions to job satisfaction: a field study. *Building Research and Information*, v. 37, n. 2, p. 129–147, 2009.
- PEREIRA, R. C.; PEREIRA, F. O. R. A qualidade da iluminação no ambiente construído: estudo da iluminação espacial. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. *Anais...* . p.1–9. São Paulo: ANTAC, 2004.
- REINHART, C. F. **Daylight availability and manual lighting control in office buildings – simulation studies and analysis of measurements**. PhD. Thesis, Karlsruhe: Technical University of Karlsruhe, Faculty of Architecture, 2001.
- REINHART, C. F. Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy*, v. 77, n. 1, p. 15–28, 2004.
- REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos*, v. 3, n. 1, p. 7–31, 2006.
- REINHART, C. F.; WALKENHORST, O. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, v. 33, n. 7, p. 683–697, 2001.
- RUCK, N.; ASCHEHOUG, Ø.; AYDINLI, S.; et al. **Daylight in buildings: a source book on daylighting systems and components**. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.
- SAXENA, M.; WARD, G. J.; PERRY, T.; HESCHONG, L.; HIGA, R. Dynamic Radiance – predicting annual daylighting with variable fenestration optics using BSDFS. SimBuild 2010 - Fourth National Conference of IBPSA-USA. *Anais...* . p.402–409. New York City, New York: International Building Performance Simulation Association, 2010.
- SMOLDERS, K. C. H. J. **Daytime light exposure: effects and preferences**. PhD. Thesis, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2013.
- TREGENZA, P. R. Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements. *Lighting Research and Technology*, v. 19, n. 1, p. 13–14, 1987.
- TUAYCHAROEN, N.; TREGENZA, P. R. Discomfort glare from interesting images. *Lighting Research and Technology*, v. 37, n. 4, p. 329–338, 2005.
- VEITCH, J. A. Lighting quality contributions from biopsychological processes. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, v. 30, n. 1, p. 3–16, 2001a.
- VEITCH, J. A. Psychological processes influencing lighting quality. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, v. 30, n. 1, p. 124–140, 2001b.
- VIÉNOT, F.; DURAND, M.-L.; MAHLER, E. Kruthof's rule revisited using LED illumination. *Journal of Modern Optics*, v. 56, n. 13, p. 1433–1446, 2009.
- WARD, G. J. The RADIANCE lighting simulation and rendering system. 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. *Anais...* , SIGGRAPH '94. p.459–472. New York, NY, USA: ACM, 1994.
- WIENOLD, J. Dynamic daylight glare evaluation. 11th International IBPSA Conference on Building Simulation. *Anais...* . p.944–951. Glasgow: IBPSA, 2009.
- WIENOLD, J.; CHRISTOFFERSEN, J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings*, v. 38, n. 7, p. 743–757, 2006.
- ZHAI, Q. Y.; LUO, M. R.; LIU, X. Y. The impact of illuminance and colour temperature on viewing fine art paintings under LED lighting. *Lighting Research and Technology*, v. 2014, n. 0, p. 1–15, 2014.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a Aline Yurika Inskawa, bolsista PIBIC CNPq/UNESP em 2012-2013 do curso de Arquitetura e Urbanismo da FAAC-UNESP, e a Sven Thomas Planitzer, da University of Applied Sciences, Zwickau, DE, bolsista do IAESTE em 2014, que participaram das pesquisas preliminares cujos resultados motivaram ao desenvolvimento do presente trabalho.