

USO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO SUPORTE A UM ESTUDO DE ILUMINAÇÃO NATURAL EM CÂMARA CLIMÁTICA

Ticiane Weiss (1); Cintia Tamura (2); Eduardo L. Krüger (3)

- (1) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, ticiane.weiss@hotmail.com
- (2) Arquiteta, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, cintiatamura@gmail.com
- (3) Eng. Civil, Doutor, Professor do PPGEC/PPGTE - UTFPR, ekruger@utfpr.edu.br

RESUMO

Em projetos arquitetônicos climaticamente orientados, a questão do acesso solar em ambientes internos está diretamente ligada a processos biológicos e de regulação temporal de seus usuários, afetando seu bem-estar e aspectos de saúde não necessariamente relacionados à visão. A presente pesquisa é parte de um estudo em andamento, que busca analisar a relação entre acesso à luz natural e aspectos relacionados à saúde e bem-estar de usuários de edificações, utilizando-se para isso de um ambiente controlado (câmara climática), desenvolvida no *Karlsruher Institut für Technologie*. Esta, projetada sobre uma plataforma giratória, permite testar o efeito de diferentes orientações de fachada envidraçada sobre variáveis subjetivas e fisiológicas de participantes voluntários, em condições experimentais. Neste contexto, o presente estudo está focado na definição de configurações passíveis de serem testadas posteriormente de forma experimental, no caso presente, via simulação computacional. Os programas Rhinoceros, Diva-for-Rhino, Radiance, Gensky, Daysim e Evalglare foram utilizados para a predição do comportamento de variáveis relacionadas à disponibilidade de acesso solar (autonomia de iluminação, valores de iluminância, ofuscamento) para diferentes orientações e épocas do ano, cujos resultados convergiram para o delineamento das configurações espaciais adotadas na etapa experimental.

Palavras-chave: acesso solar, luz natural, saúde, simulação computacional.

ABSTRACT

In climate-responsive building design, the issue of solar access indoors is directly linked to biological processes and temporal regulation of its users, affecting their well-being and health conditions not necessarily related to vision. The ongoing research is aimed at the analysis of the relationship between daylight access and aspects related to health and well-being of building users. For this, we use a controlled environment (climate chamber), built on top of a rotating platform, which allows us to test the effect of the facade orientation on subjective and physiological variables of voluntary participants, under experimental conditions. The climate chamber was developed at the *Karlsruher Institut für Technologie*, and the present study is focused on the definition of configurations that can be later tested at the experimental stage, at this point through computer simulation. The group of software Rhinoceros, Diva-for-Rhino, Radiance, Gensky, Daysim and Evalglare was employed for assessing the main variables related to daylight access (daylight autonomy, room illuminance, glare), for an array of facade orientations and seasons, in order to guide experimental design.

Keywords: solar access, daylight, health, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

Em um projeto arquitetônico orientado ao favorecimento de acesso solar nos ambientes internos, a latitude do sítio, bem como a geometria do edifício e a orientação solar de suas faces com aberturas devem ser adotados como principais diretrizes (ESCH, VAN; LOOMAN; BRUIN-HORDIJK, DE, 2012; CASTRO PEREZ; FAVERO, 2009; CASTRO PEREZ, 2013). Caso contrário, os ambientes podem vir a apresentar umidade excessiva, iluminação insuficiente e baixas temperaturas em algumas estações do ano (FROTA; SCHIFFER, 2001; MARINS; ROMÉRO, 2012). Este conjunto de fatores, por sua vez, podem ocasionar efeitos não favoráveis em seres humanos que habitam e/ou utilizam estas construções, como desconforto térmico e visual (PRADO, 2006; SEONG et al., 2006).

A luz natural, além de permitir a visualização do mundo, está ligada a processos biológicos e de regulação temporal mediados pela produção hormonal, como a melatonina. Estudos recentes relacionam a melatonina ao controle de moléstias como obesidade (inibição da compulsão por alimentos), câncer (inibição do crescimento de tumores), acidente vascular cerebral (redução da inflamação e do edema cerebral), insônia (indutor de sono), enxaqueca (redução de incidência de crises), Alzheimer (retardo do avanço da enfermidade), entre outros (PEREIRA; OLIVEIRA, 2013). Assim, práticas atuais relacionadas à obtenção de níveis adequados de iluminação artificial baseadas somente no atendimento de requisitos visuais, “podem estar totalmente inadequadas para atender os requisitos da estimulação biológica” (MARTAU, 2009, p. 128). Considerando-se o irreversível movimento de verticalização e adensamento constatado nas grandes cidades (PEDRAZA et al., 2013; RAMIRES, 2011), resultando muitas vezes em unidades habitacionais ou comerciais com pouco ou nenhum acesso à luz solar (KRÜGER; SUGA, 2009), a importância de metodologias adotadas para a incorporação de mecanismos para provimento do acesso solar em ambientes internos ultrapassa questões projetuais ergonômicas e estéticas, para adentrar ao domínio da saúde pública (TAMURA, 2010).

Para melhor antecipar os efeitos da iluminação nos ocupantes, a simulação computacional tem sido utilizada com crescente precisão (GUGLIELMETTI; PLESS; TORCELLINI, 2010). Através de simulações dinâmicas de iluminação natural, que levam em consideração a iluminância ou luminância geradas por um arquivo climático durante um determinado período de tempo (REINHARDT; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006), é possível identificar momentos com maior incidência direta de luz solar, ofuscamento no campo de visão e verificar se os ocupantes possuem iluminação natural insuficiente para desempenhar satisfatoriamente suas tarefas. A ocorrência do excesso ou falta de iluminação adequada pode então ser utilizada para orientar e otimizar projetos ou, no caso dos testes aplicados na câmara climática em estudo, antecipar períodos de desconforto e direcionar as análises para as conseqüentes reações fisiológicas a que os ocupantes serão submetidos.

2. OBJETIVO

Diante do contexto exposto acima, o objetivo deste artigo é apresentar a metodologia adotada para determinação de orientações passíveis de teste para as fachadas de uma edificação experimental de forma a se obter a máxima diferenciação entre acesso a luz natural entre fachadas, porém, sem ofuscamento direto no plano de trabalho. O estudo se utiliza da simulação computacional como suporte a uma pesquisa de campo, cujo método é descrito sumariamente neste artigo e cujo objetivo é verificar a influência da luz natural em variáveis relacionadas às condições de saúde e ao bem-estar de indivíduos expostos a um mesmo ambiente, porém, com diferentes graus de acesso solar.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em quatro etapas principais: (1) descrição da câmara climática; (2) caracterização das condições gerais a serem testadas; (3) método de simulação; (4) apresentação e análise dos resultados.

3.1. Descrição da câmara climática

O experimento de campo é realizado nas dependências do LOBSTER (*Laboratory for Occupant's Behavior, Satisfaction, comfort Thermal, and Environmental Research*), câmara climática de propriedade do *Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau, Karlsruhe Institut für Technologie* (fbta/KIT). O equipamento é constituído de uma câmara autônoma com dois ambientes teste configurados à maneira de escritórios, equipados com mesas para trabalho, computadores e acesso à internet. Para cada um destes ambientes teste, variáveis como temperatura do ar e temperatura de superfície, velocidade do ar, umidade

relativa, entre outras, podem ser monitoradas e/ou controladas. Além disso, as variáveis climáticas são continuamente registradas por uma estação meteorológica instalada sobre a cobertura da câmara. Uma descrição pormenorizada da câmara climática é apresentada por Schweiker et al. (2014), e informações adicionais estão disponíveis no website do LOBSTER (<http://129.13.252.6/contao/>).

Para a pesquisa de campo, serão utilizados adicionalmente em cada ambiente espectrorradiômetros para a coleta de dados de iluminância e do espectro da luz incidente, em função da seção de cada dia de teste.

Para os objetivos desta pesquisa, é especialmente relevante o sistema de rotação do LOBSTER, o qual possibilita alinhar a fachada envidraçada dos escritórios a diferentes orientações geográficas. Isto é possível graças ao trilho circular existente na base da câmara, o qual permite a obtenção de giros de até 350°. A Figura 1 apresenta a planta simplificada (a) e uma visão geral da câmara e seu entorno (b).

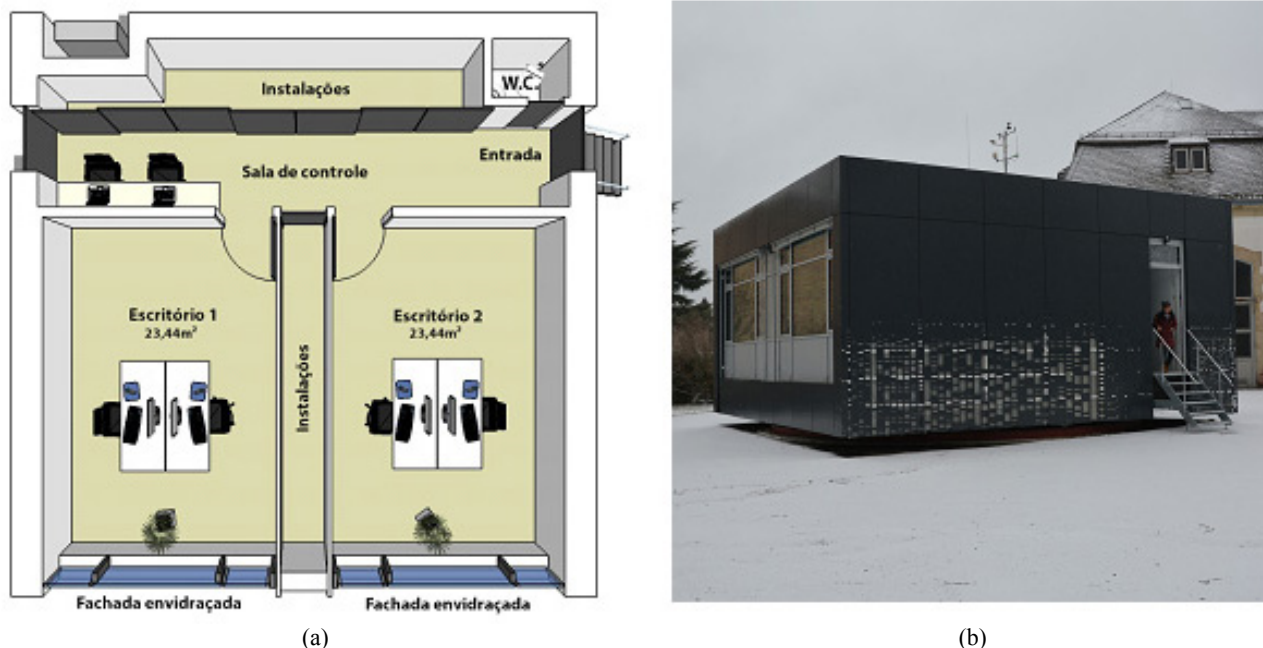


Figura 1 - (a) Planta do LOBSTER; (b) vista externa geral da câmara climática e das aberturas envidraçadas.

As seções de teste envolvem três configurações básicas: 1) fachada recebendo luz direta; 2) fachada sombreada; 3) luz artificial com sombreamento da fachada. Cada seção envolve a permanência de participantes no ambiente interno por cinco horas ininterruptas, durante as quais são coletados dados subjetivos e fisiológicos, não discutidos neste artigo.

3.2 Procedimento de simulação computacional

Para prever a incidência de iluminação natural e possível desconforto em ocupantes, realizaram-se simulações computacionais. Deste modo, os escritórios do LOBSTER foram testados quanto a autonomia e disponibilidade de iluminação natural, além da probabilidade de ofuscamento.

Enquanto a disponibilidade de iluminação natural corresponde à quantidade de luz incidente no espaço (REINHARDT; WIENOLD, 2011), a autonomia de iluminação natural é, segundo Reinhardt (2014), a porcentagem de tempo em que a iluminação natural no ambiente atinge certo nível, definido geralmente por normas. O LOBSTER foi testado para autonomia de 500 lux, de acordo com recomendações da norma alemã DIN EN 12464-1 para ambientes de escritórios¹.

Como complemento a ambas as análises, delineou-se também a faixa de 100 e 2000 lux incidente no plano de trabalho, conforme definição da métrica *Useful Daylight Illuminance* (UDI), qual seja, a de faixa útil de iluminância no ambiente de trabalho. Ao filtrar os resultados desta forma, é possível prever a qualidade da iluminação; estudos de Mardaljevic e Nabil (2006) com ocupantes de ambientes de escritório apontaram 100 lux como muito escuro e níveis acima de 2000 lux como geradores de desconforto visual e/ou térmico (MARDALJEVIC; NABIL, 2006). Por dependerem de condições climáticas que definem a incidência anual de iluminância e luminância no espaço interno (REINHARDT; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006), estas três métricas – disponibilidade e autonomia de iluminação e UDI – são chamadas de *climate-based*.

¹ DIN EN 12464-1: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen.

O último tipo de simulação à qual a câmara climática foi submetida foi a análise de probabilidade de ofuscamento. Trata-se de desconforto, dificuldade ou até impossibilidade de visão que ocorre quando há luminância maior no campo de visão que o tolerado pelo olho humano. Seu grau e probabilidade, portanto, dependem do tamanho da fonte luminosa, da sua localização e luminância acima daquela a qual o olho está adaptado (IESNA, 2005).

Há diversas métricas para se calcular o ofuscamento, mas experimentos de Wienold e Christoffersen (2005) demonstraram que ainda havia diferenças entre resultados dessas em relação a medições de luminância por meio de câmeras do tipo CCD (*charge-coupled device*) e de respostas de ocupantes dos ambientes. Por isso, para o LOBSTER, utilizou-se o modelo criado por estes autores, chamado DGP (*Daylight Glare Probability*, ou probabilidade de ofuscamento por iluminação natural, em tradução livre), que leva em consideração todos os fatores determinantes do ofuscamento, descritos pela *Illuminating Engineering Society*, em algoritmos validados por testes empíricos, mas se concentra na probabilidade de desconforto ao invés de valores absolutos (WIENOLD, CHRISTOFFERSEN, 2005). Em outro estudo, Wienold expande o conceito e determina “classes” ou faixas de valores que corresponderiam a ofuscamento intolerável (a partir de 45%), incômodo (maior que 40% a 45%) e perceptível (maior que 35% a 40%). Abaixo de 35%, o ofuscamento é considerado imperceptível (WIENOLD, 2009).

3.2.1 Modelo computacional e ferramentas de simulação adotadas

O modelo do ambiente-teste foi desenhado no *software* Rhinoceros e as análises foram desenvolvidas com a utilização do *plugin* DIVA (sigla para *Design Iterate Validate Adapt*, ou em tradução livre, Projetar Iterar Validar Adaptar) versão 2.1.1.0. Além de análises de iluminação natural, o DIVA permite simular radiação incidente e consumo de energia, apoiando-se nos *softwares* DAYSIM, Radiance (JAKUBIEC; REINHARDT, 2011) e Evalglare.

Através do Radiance, DIVA identifica as superfícies com as quais os raios luminosos podem interagir, e calcula de forma inversa, ou seja, do ponto de análise (observador ou um fotômetro virtual) para a fonte luminosa (JACOBS, 2012). Daysim, por sua vez, utiliza-se do Radiance para calcular a iluminância através de dados climáticos (REINHARDT; WIENOLD, 2010). Por último, Evalglare calcula a probabilidade de ofuscamento (*Daylight Glare Probability* – DGP) (REINHARDT; WIENOLD, 2010), métrica esta desenvolvida a partir da combinação de métricas existentes e de testes empíricos (WIENOLD; CHRISTOFFERSEN, 2005). A Figura 2 demonstra o processo de trabalho entre os programas.

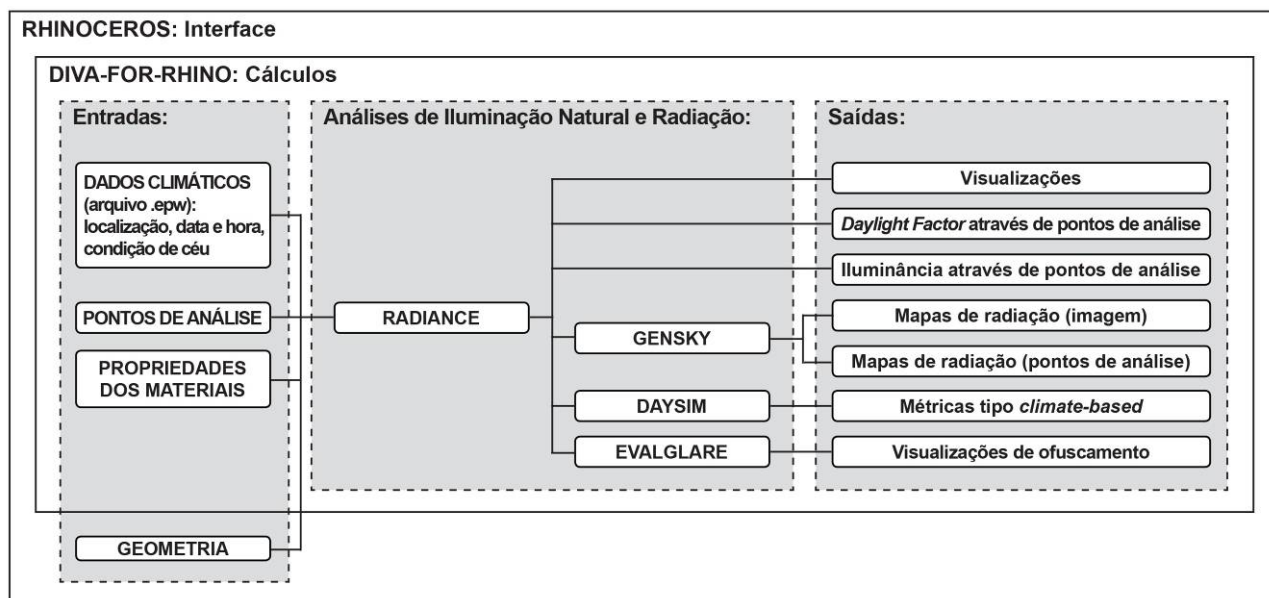


Figura 2 - Processo de interação entre os programas Rhinoceros, Diva-for-Rhino, Radiance, Gensky, Daysim e Evalglare. Adaptado de Dondeti e Reinhart (2011).

3.2.2 Condições analisadas

Ao incidir sobre um objeto, a luz é afetada pelas propriedades do material, como cores, rugosidade, especularidade etc. Estas características foram inseridas no Diva-for-Rhino e levadas em consideração para simular as condições do LOBSTER. As refletâncias de superfícies opacas seguem os seguintes índices:

- Parede interna: 60%.
- Superfície externa do laboratório: metal difuso com refletância de 50%, especularidade de 0,9 e rugosidade de 0,175.
- Piso interno: piso emborrachado com refletância de 49% (vermelho), 48% (verde), 46% (azul) e 0,01 de rugosidade.
- Piso externo: 20%.
- Forro: 80%.
- Portas: 60%.
- Edifícios vizinhos foram considerados com refletância genérica de 35%.

O laboratório possui também dois tipos de vidros. A simulação baseou-se nas informações dos modelos escolhidos e instalados. Para janelas operáveis, o vidro triplo adotado possui transmitância de luz visível (*Visible Light Transmittance – VLT*) 70. Já onde é fixo, o vidro triplo possui VLT 72. Ambos foram inseridos sem coloração na composição do material. Esquadrias foram classificadas como “metal difuso”.

Os edifícios do entorno da edificação também foram modelados, ainda que de forma simplificada no que se refere a materiais e aberturas, pois influenciam na iluminação que incide sobre o módulo.

3.2.3 Pontos de análise

Para análises dependentes de condições climáticas – quando o ambiente é afetado por mudanças durante um período determinado de tempo, como em disponibilidade e autonomia de iluminação natural – deve-se estabelecer “nós” de análise, ou seja, pontos de onde o *software* partirá para gerar os resultados.

A disposição dos pontos para cada sala segue o padrão da Figura 3. É importante acrescentar que foi dada ênfase nos pontos 3, 10, 17, 24 e 31, pois se trata da área ocupada pelos indivíduos a serem testados na pesquisa de campo; esta área está sinalizada com o retângulo vermelho. Os resultados das simulações concentraram-se nos dados gerados a partir destes pontos.

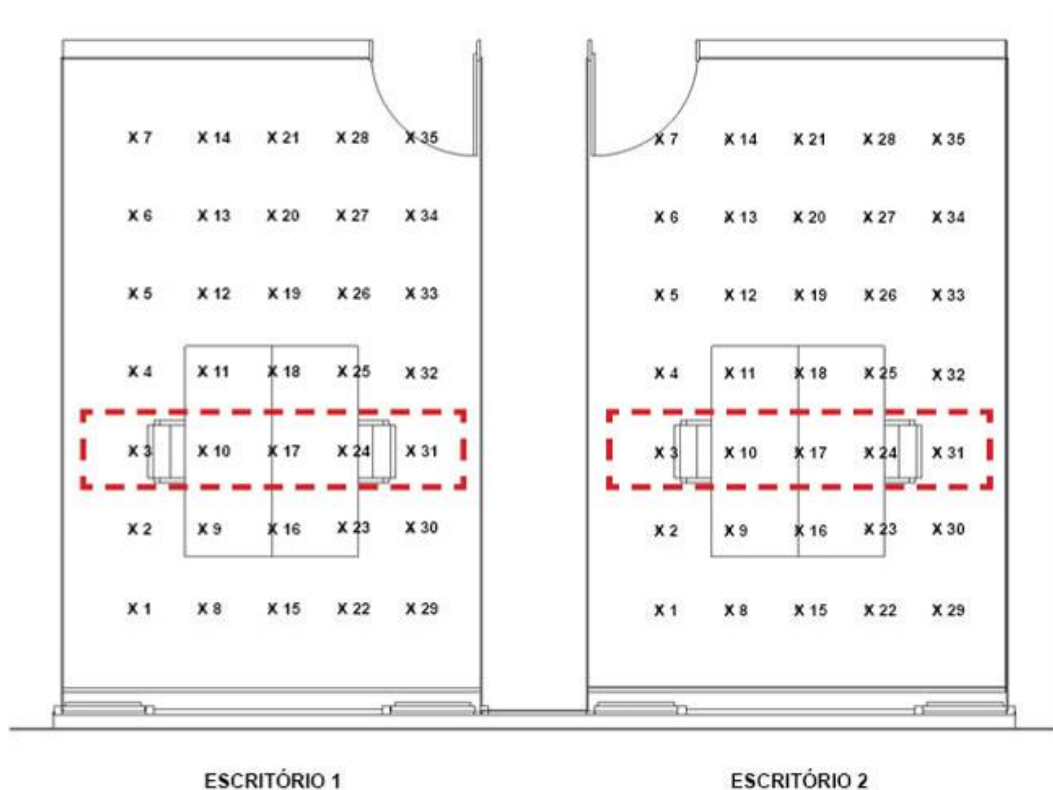


Figura 3 - Localização esquemática dos nós a partir da janela, com o delineamento das estações de trabalho.

Cada sala foi simulada separadamente para as orientações norte (N), nordeste (NE), leste (E), sudeste (SE), sul (S), sudoeste (SW), oeste (W) e noroeste (NW), ou seja, a um passo de 45°, a fim de identificar aquelas que possibilitariam os cenários mais interessantes para testar os ocupantes do LOBSTER. Como resultado das simulações para disponibilidade e autonomia de iluminação natural, DIVA gera arquivos em lux hora a hora, durante

um ano. Porém, como o estudo de campo foi programado somente para a faixa das 8h00 – 13h00, a análise engloba esse intervalo, iniciando trinta minutos antes e terminando trinta minutos depois do intervalo de análise.

3.2.4 Modelos de céu

Para as simulações de disponibilidade e autonomia de iluminação natural e ofuscamento anual, DIVA utiliza o modelo de céu gerado por arquivos climáticos tipo .epw (*Energy Plus Weather file*). Estes arquivos reúnem informações de outro formato de dado, qual seja o TMY (*typical meteorological year*, ou ano meteorológico típico)², e os traduz para uso em softwares de simulação. TMY trata-se de uma compilação de dados climáticos por hora pelo período de um ano realizado e mantido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (IESNA, 2005). As situações de céu partem, portanto, de medições que formam um padrão de clima para cada período.

As imagens de visualização foram geradas com o modelo de céu da CIE “*clear sky with sun*” (céu aberto com sol). Este modelo, junto com o CIE “*overcast sky*” (céu encoberto), simula as situações extremas de céu. O primeiro foi escolhido por evidenciar a trajetória da luz solar e possibilitar a previsão de ofuscamento nos pontos de análise (3, 10, 17, 24 e 31, conforme Figura 3).

4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

No geral, o modelo apresentou boa autonomia de iluminação natural (acima de 500 lux, referência adotada a partir da norma alemã DIN EN 12464-1). A Figura 4 demonstra que os pontos 3, 10, 17, 24 e 31, conforme a Figura 3, tiveram índices em torno de 80% para todas as orientações, o que significa que em aproximadamente 80% das horas no ano os ocupantes que se encontrarem nos pontos de análise não precisarão de iluminação artificial para desempenharem suas tarefas regulares. Isto ocorre porque as salas são pequenas, com área de vidro correspondendo a 75% da área interna da parede da fachada. No entanto, há grande variação na iluminância verificada entre as estações do ano, bem como entre as orientações, como demonstram os gráficos da Figura 5 e da Figura 6.

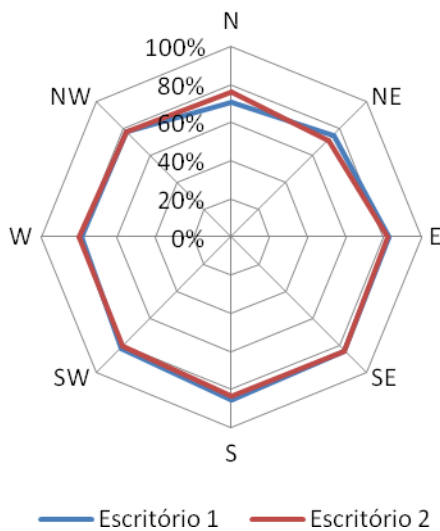


Figura 4 - Autonomia de iluminação natural - 80% de horas anuais durante o período do dia considerado.

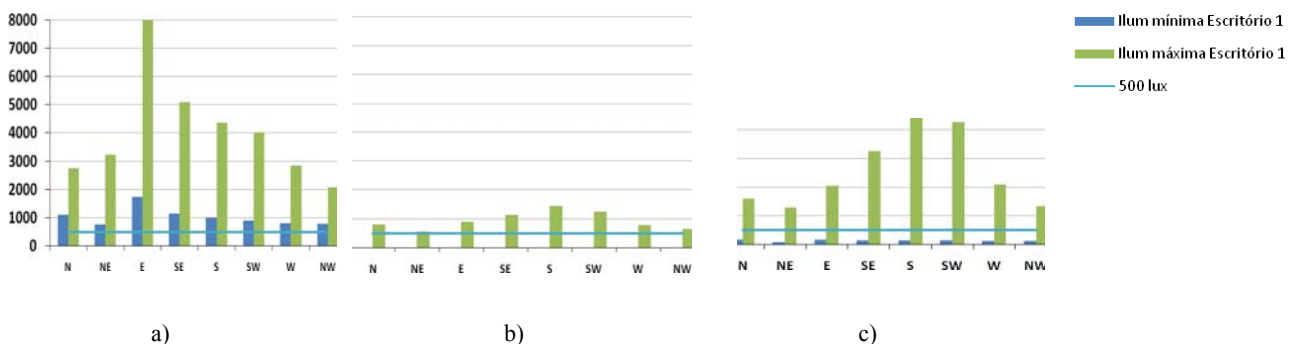


Figura 5 - Iluminância mínima e máxima entre 7h30 e 13h30 (em lux) para o escritório 1: a) verão; b) inverno; c) equinócios.

² Os arquivos climáticos do tipo .epw e TMY podem ser adquiridos sem custo na página do U.S. Energy Department (Departamento de Energia dos Estados Unidos), seção do *software EnergyPlus*, a saber: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm> .

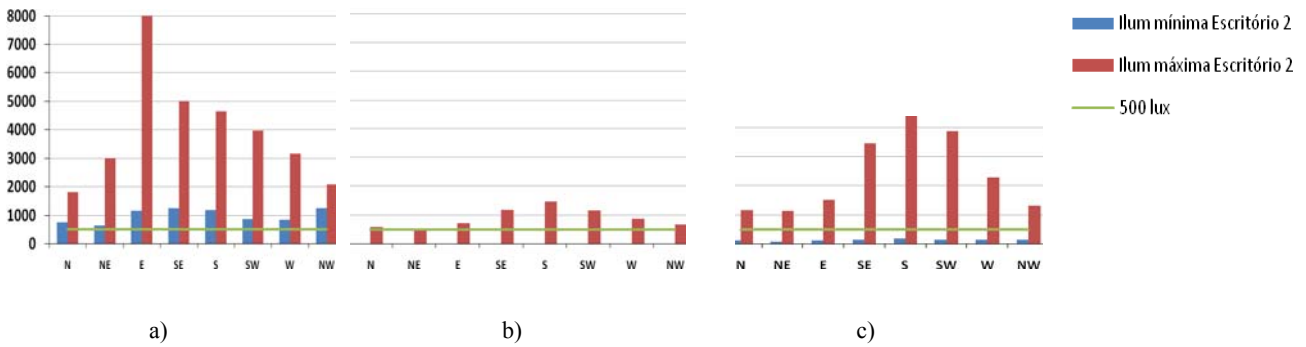
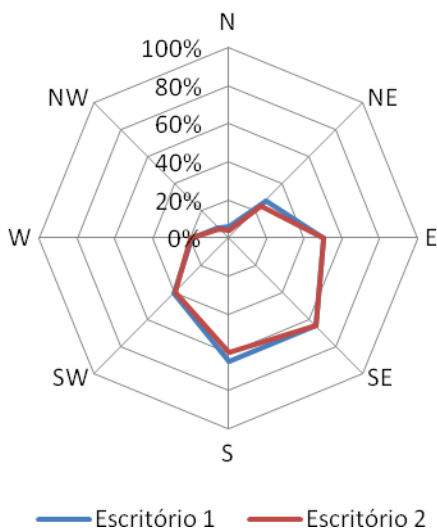


Figura 6 - Iluminância mínima e máxima entre 7h30 e 13h30 (em lux) para o escritório 2: a) verão; b) inverno; c) equinócios.



Quanto à ocorrência de situações de ofuscamento, foi avaliada a porcentagem de horas (período entre 7h30 e 13h30) do ano com ocorrência de ofuscamento acima de 35%, considerado incômodo

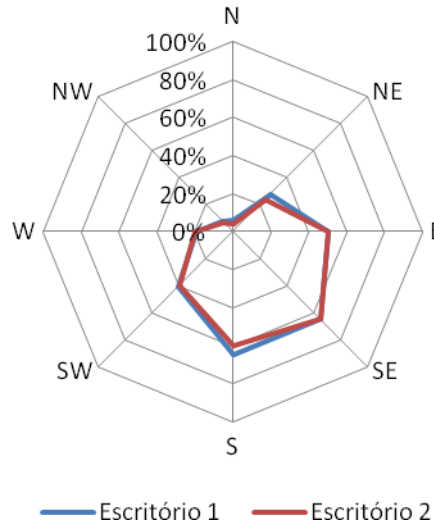


Figura 7- Porcentagem de horas de ofuscamento anual entre 7h30 e 13h30.

Figura 7). A

incidência ocorre em maior grau entre as orientações leste (E) e sudoeste (SW). A orientação leste, em especial, demonstrou alto nível de disponibilidade de iluminação natural durante o verão conforme Figura 5-a, porém, com possibilidade de ocorrência de ofuscamento incomodativo nos pontos analisados em 50% das horas.

A título de exemplo, os dados sobre a probabilidade de ofuscamento (DGP) no ponto 10, plano de trabalho de um dos escritórios (conforme a Figura 3), nas datas de início e fim dos períodos de teste de cada estação do ano, encontram-se na Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 a seguir, para cada orientação de fachada analisada.

Tabela 1 – Valores de DGP para as oito orientações de fachada para o período experimental de inverno (12 jan-6 fev).

Horário	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
7h30	0%-0%	0%-0%	0%-0%	0%-0%	0%-0%	0%-0%	0%-0%	0%-0%
8h30	2%-3%	2%-2%	4%-7%	4%-7%	4%-6%	4%-7%	3%-5%	3%-5%
9h30	21%-21%	21%-20%	23%-22%	24%-22%	23%-22%	22%-22%	22%-22%	21%-21%
10h30	23%-22%	23%-22%	28%-25%	31%-25%	28%-24%	26%-24%	25%-24%	24%-23%
11h30	25%-24%	25%-23%	29%-26%	36%-27%	35%-26%	30%-26%	27%-25%	26%-25%
12h30	25%-24%	26%-23%	30%-27%	56%-28%	100%-27%	41%-27%	28%-26%	26%-25%
13h30	25%-24%	24%-23%	28%-26%	31%-27%	36%-27%	32%-27%	28%-26%	26%-25%













Tabela 2 - Valores de DGP para as oito orientações de fachada para o período experimental de primavera (13 abr-8 mai).

Horário	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
7h30	24%-27%	25%-28%	30%-36%	28%-33%	26%-29%	26%-29%	25%-28%	25%-28%
8h30	28%-33%	29%-53%	40%-100%	38%-72%	33%-42%	31%-38%	30%-36%	29%-35%
9h30	29%-28%	38%-37%	72%-63%	73%-60%	43%-39%	34%-33%	33%-31%	32%-30%
10h30	33%-32%	34%-36%	46%-58%	51%-68%	44%-49%	41%-39%	37%-36%	35%-34%
11h30	29%-37%	31%-36%	46%-48%	63%-52%	56%-49%	41%-47%	34%-43%	31%-40%
12h30	35%-33%	34%-35%	44%-41%	49%-54%	50%-60%	48%-52%	42%-40%	38%-36%
13h30	30%-34%	30%-37%	35%-37%	46%-44%	63%-44%	59%-66%	40%-45%	32%-34%

Tabela 3 - Valores de DGP para as oito orientações de fachada para o período experimental de verão (22 jun-17 jul).

Horário	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
7h30	24%-27%	24%-100%	27%-100%	27%-50%	26%-31%	26%-30%	25%-30%	25%-29%
8h30	27%-28%	26%-51%	31%-100%	31%-59%	29%-33%	30%-32%	29%-32%	28%-31%
9h30	29%-29%	39%-41%	63%-72%	56%-64%	38%-38%	34%-33%	31%-33%	31%-32%
10h30	37%-31%	37%-37%	50%-58%	52%-64%	46%-45%	44%-36%	41%-35%	39%-33%
11h30	38%-32%	37%-37%	50%-48%	52%-62%	49%-53%	48%-41%	44%-37%	41%-34%
12h30	39%-34%	37%-37%	48%-42%	51%-54%	50%-59%	51%-51%	46%-40%	42%-35%
13h30	38%-34%	36%-36%	45%-37%	48%-41%	49%-54%	52%-57%	47%-42%	42%-34%

As porcentagens apresentadas demonstram que em qualquer das orientações haverá ofuscamento para o ocupante situado no ponto 10, pois a proximidade do ponto com a janela influencia no campo de visão. No entanto, as imagens na Figura 8, que apresentam a situação do mesmo escritório com a janela voltada para a fachada sul, mostram que tal ofuscamento não é resultado da luz do sol incidindo diretamente no plano de trabalho para os períodos analisados no verão e primavera, mas apenas para a situação de inverno. As imagens se referem à situação do ambiente ao final de cada etapa.

Horário	Inverno	Equinócio de primavera	Verão
8h00			
9h00			
10h00			
11h00			

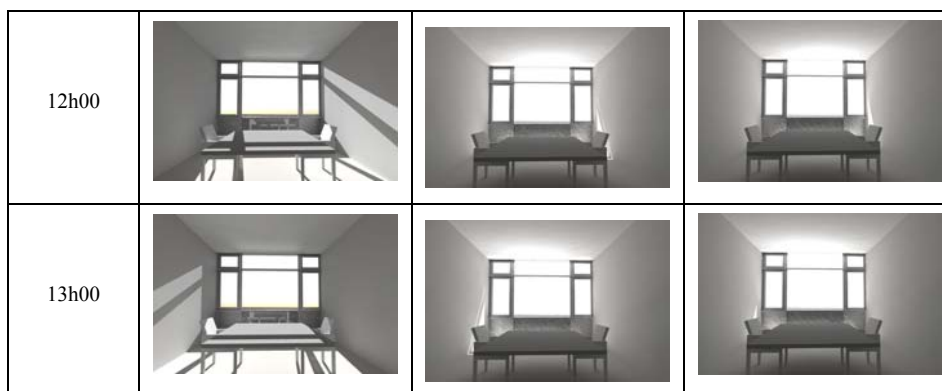


Figura 8 - Imagens do escritório 2, com a janela voltada para a fachada sul, para as três estações do ano.

Assim, apesar da fachada sul apresentar a melhor condição para a obtenção de acesso solar, também apresenta a maior possibilidade de ocorrência de ofuscamento no plano de trabalho definido para os ocupantes. Desta forma, com a finalidade de se obter diferenciação entre acesso a luz natural, porém, sem ofuscamento no plano de trabalho, adotou-se como parâmetro a condição mais desfavorável, a fachada norte, e a condição mais favorável, mas com alguma alteração nas três estações analisadas. Desta forma, para o inverno, foi selecionada como opção a fachada sudoeste; para a primavera, uma situação intermediária, aproximadamente 200° de azimute³; finalmente, para o verão, adotou-se a fachada sul. A partir dos resultados simulados, o plano experimental para a pesquisa de campo foi delineado conforme a Tabela 4, a seguir.

Tabela 4 – Plano experimental para uso da câmara climática LOBSTER.

Estação/Período	Configuração 1	Configuração 2	Diferenças entre fachadas ($E_{max_{medio}}$ em lux, para solstícios e equinócio)	Diferenças entre fachadas (DGP_{medio} para cada período – média para cada secção experimental de 5 horas)
Inverno (12 jan-6 fev)	Fachada norte	Fachada sudoeste (SW)	579	4%
Primavera (13 abr-8 mai)	Fachada norte	Azimute 200° (S/SW)	4011*	12%*
Verão (22 jun-17 jul)	Fachada norte	Fachada sul (S)	2825	9%

* média aritmética entre as orientações S e SW.

5. CONCLUSÕES

Concluiu-se que as melhores orientações para estudar a disponibilidade de iluminação natural e sua autonomia em ambas as salas, com baixa probabilidade de ofuscamento por luz do sol direta no plano de trabalho, seriam sudoeste, oeste, noroeste e norte, as quais trazem também variabilidade das condições de insolação. A partir dos resultados alcançados, pôde-se obter um programa experimental para a pesquisa de campo. Além disso, a comparação entre orientações diversas permite testar-se a disponibilidade de iluminação, sem grande interferência de luz do sol no plano de trabalho, o que seria objeto do estudo de campo. Para os casos em que se procura estudar os efeitos do ofuscamento, as orientações leste, sudeste e sul apresentam as melhores oportunidades.

REFERÊNCIAS

CASTRO PEREZ, D. R.; FAVERO, E. . O envelope solar como instrumento de regulamentação de acesso ao sol no espaço urbano e nas edificações: o caso de Campinas/SP, Brasil. In: XIII **Seminário de Arquitectura Latinoamericana**: Arquitectura y Clima, v. 1. p. 1-3, 2009.

³ Observação in loco da entrada do sol próximo ao equinócio mostrou incidência de luz solar, embora em pequena proporção, no plano de trabalho em torno do meio-dia. Atribui-se a diferença entre observação direta e resultados de simulação a pequenos erros de ajuste do modelo computacional. A opção pela orientação intermediária entre inverno e verão foi, assim, resultante de observação direta e não de simulação computacional (ajuste fino).

- CASTRO PEREZ, D.R. **Diretrizes solares para o planejamento urbano: o envelope solar como critério para adensamento e verticalização**. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2013, 255 p. Tese de Doutorado.
- DONDETI, K.; REINHART, C. F. A ‘Picasa’ for BPS—An Interactive Data Organization and Visualization System for Building Performance Simulations. In: **Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Simulation Association**, Sydney, Australia, 2011. p. 1250-1257. Disponível em: <http://www.gsd.harvard.edu/research/gsdsquare/Publications/Picasa_BS2011.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2015.
- ESCH, M. M. E. VAN; LOOMAN, R. H. J.; BRUIN-HORDIJK, G. J. DE. The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 189–200, 2012.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. Studio Nobel, 2001.
- GUGLIEMETTI, R.; PLESS, S.; TORCELLINI, P. On the use of integrated daylighting and energy simulations to drive the design of a large net-zero energy office building. In: **Proc. Fourth National Conference of IBPSA-USA**, New York, NY, 2010. Disponível em: <http://www.nrel.gov/sustainable_nrel/pdfs/47522.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2015
- IESNA. ANSI/IES RP-16-10 **Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering**. Illuminating Engineering Society of North America: New York, 2005.
- JACOBS, A. **Radiance Tutorial**, 2012. p. 8. Disponível em: <http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/documentation/docs/radiance_tutorial.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2015.
- JAKUBIEC, A.; REINHARDT, C. Diva 2.0: Integrating Daylight And Thermal Simulations Using Rhinoceros 3d, Daysim And Energyplus. **Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association**, Sydney, 2011. Disponível em: <http://ibpsa.org/proceedings/BS2011/P_1701.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2015.
- KRÜGER, E.; SUGA, M. Thermal and daylighting evaluation of the effect of varying aspect ratios in urban canyons in Curitiba, Brazil. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 1, p. 33108, 2009.
- MARDALJEVIC, J.; NABIL, A. The useful daylight illuminance paradigm: A replacement for daylight factors. **Lux Europa**, p.169–174, 2005.
- MARINS, K. R. DE C. C.; ROMÉRO, M. DE A. Integration of urban morphology constraints in the development of a methodology for urban energy planning. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 117–137, 2012.
- MARTAU, B. T. **A luz além da visão: iluminação e sua relação com a saúde e bem-estar de funcionárias de lojas de rua e shopping centers em Porto Alegre**. Campinas, 2009. 504 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 2009.
- PEREIRA, C.; OLIVEIRA, M. O super hormônio. **REVISTA ISTOÉ INDEPENDENTE**. Edição nº2281, de 02. ago, 2013. Disponível em: <http://www.istoe.com.br/reportagens/317231_O+SUPER+HORMONIO>. Acesso em: 17 abr. 2015.
- PRADO, A. L. Em busca da pertinência para uma arquitetura tropical. **MDC Revista de Arquitetura e Urbanismo**. Belo Horizonte, Officina 3 Consultores Associados, n.1, 2 e 3, p. 10-13, 2006. Disponível em: <<http://mdc.arq.br/2006/01/31/em-busca-da-pertinencia-para-uma-arquitetura-tropical/>>. Acesso em: 17 abr. 2015.
- RAMIRES, J. C. L. O processo de verticalização das cidades brasileiras. **Boletim de Geografia**, v. 16, n. 1, p. 97–106, 2011.
- REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The daylighting dashboard—A simulation-based design analysis for daylit spaces. **Building and environment**, v. 46, n. 2, p. 386-396, 2011. Disponível em: <<http://www.gsd.harvard.edu/research/gsdsquare/Publications/HolisticDaylightingDesignEvaluations.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2015.
- REINHARDT, C. **Daylight Handbook I: Fundamentals / Designing with the Sun**. United States of America: Christoph Reinhardt, 2014.
- REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. **Leukos**, v. 3, n. 1, p. 7-31, 2006. Disponível em: <<http://isites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic256760.files/DynamicDaylightPerformanceMetricsInLeukos.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2015.
- SEONG, Y.-B. et al. Solar rights analysis system for apartment buildings. **Solar energy**, v. 80, n. 6, p. 723–741, 2006.
- SOLEMNA LCC. **Diva for Rhino**. Disponível em: <<http://diva4rhino.com/>>. Acesso em: 01 mar. 2015.
- SCHWEIKER, M., BRASCHE, S., HAWIGHORST, M., BISCHOF, W., WAGNER, A. Presenting LOBSTER, an innovative climate chamber, and the analysis of the effect of a ceiling fan on the thermal sensation and performance under summer conditions in an office-like setting. In: **Proceedings of 8th Windsor Conference: Counting the Cost of Comfort in a Changing World**. Windsor, Reino Unido, p. 924-937, abr. 2014.
- TAMURA, C. A. **Análise da influência dos parâmetros edifícios na obtenção de acesso solar nas zonas residenciais de Curitiba**. 2010. 231 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Desenvolvimento) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.
- US DEPARTMENT OF ENERGY. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>>. Acesso em: 22 fev. 2015.
- WIENOLD, J.; CHRISTOFFERSEN, J. Towards a new daylight glare rating. **Lux Europa**, Berlin, p. 157-161, 2005. Disponível em: <http://www.ingelux.com/ecco_build/paper_luxeuropa2005.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2015.
- WIENOLD, J. Dynamic daylight glare evaluation. In: **Proceedings of Building Simulation**. 2009. p. 27-30. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0944_951.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2015.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela concessão de bolsas doutorado-sanduíche e estágio sênior, o que viabilizou a realização desta pesquisa. Agradecimentos aos colegas do *Karlsruher Institut für Technologie*, em especial ao Prof. Andreas Wagner e ao Dr. Marcel Schweiker, pelo fornecimento de dados projetuais para utilização posterior da câmara climática.