# RECOMENDAÇÕES DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA ILUMINAÇÃO NATURAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SALAS COMERCIAIS NO TRÓPICO ÚMIDO

**Iuri Araújo (1); Leonardo Bittencourt (2)**
(1) Me, Professor do Curso de Arquitetura e Urbanismo – Campus Arapiraca, iuriavila@arapiraca.ufal.br, Universidade Federal de Alagoas – Campus Arapiraca, Rua Dep. José Lages, 345, Ponta Verde, Maceió-AL, CEP: 57035-330. Ed Classic, apto. 201. +55 82 99308 5395
(2) Dr, Professor do PPGAU-FAU-UFAL, lsb54@hotmail.com, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - Universidade Federal de Alagoas, Rua Jerônimo de Albuquerque, 431, Ponta Verde, Maceió-AL, CEP: 57035-020. Ed. Arunachala, apto. 601. +55 82 99919 8009

## RESUMO
O presente trabalho teve por objetivo identificar a razão entre área de janela e área útil do recinto, associada à maior eficácia da iluminação natural com eficiência energética, considerando uso de janela sombreada, ar condicionado e iluminação híbrida, em salas comerciais no trópico úmido do Brasil. As recomendações de pré-dimensionamento mais usadas por arquiteto, nas etapas preliminares de projeto, visando à iluminação natural eficaz, enfocam o tamanho da janela e a profundidade do recinto. Mas há informação limitada a respeito na literatura técnica brasileira e estudos anteriores sobre o tema ignoraram aspectos relevantes na avaliação da iluminação natural e do consumo de energia. O método consiste em uma análise comparativa do desempenho de modelos computacionais. A avaliação baseou-se em iluminância útil, uniformidade da iluminação, iluminância excessiva e consumo com iluminação e ar condicionado. Simulação computacional com a ferramenta *Daysim* e *DesignBuilder* gerou os dados. A análise comparou os intervalos de variação do desempenho por quatro parâmetros e em quatro valores da razão janela/piso. Os resultados mostraram valores que estão além dos limites apontados pela literatura sendo bem sucedidos. Espera-se que esses resultados contribuam no aperfeiçoamento de recomendações de pré-dimensionamento para climas quentes.

Palavras-chave: Iluminação natural. Sombreamento. Trópico úmido.

## ABSTRACT
The present work aimed to identify the window to floor ratio associated more effectiveness to daylighting and low energy building, regarding full shaded window, air conditioning and hybrid lighting, in office rooms, in the humid tropic of Brazil. The rule of thumb most used by architects in early design stages, aiming at effective daylighting, focus on window size and room depth. However, there is limited information about it in the Brazilian technical literature and previous works have ignored relevant aspects in the assessment of daylighting and energy consumption. The method consists of a comparative analysis of the performance of computer models. The evaluation was based on useful illuminance, daylighting uniformity, glare illuminance and consumption with lighting and air conditioning. Computer simulation with Daysim and DesignBuilder tools generated the data. The analysis compared ranges of performance variation by four parameters and in four window to floor ratio values. The results showed values that are beyond the limits pointed out in the literature, being successful. These results are expected to contribute to the improvement of design guidelines for warm climates.

Keywords: Daylight. Shading devices. Humid tropic.

## 1. INTRODUÇÃO

A iluminação natural é determinante para o conforto visual e eficiência energética. As decisões de projeto mais impactantes para a iluminação natural são tomadas pelo arquiteto, durante a etapa preliminar de projeto e com base em recomendações de pré-dimensionamento (REINHART e FITZ, 2006; GALASIU e REINHART, 2007). A simulação computacional de iluminâncias é um meio efetivo para orientar decisões de projeto. Mas, estudos veem apontando que a parcela dos arquitetos que as utiliza como suporte é pequena (VENÂNCIO, 2012; MATOS; SCARAZZATO, 2017). Assim, é frequente que questões de projeto envolvendo iluminação natural sejam decididas apenas com base em dicas de pré-dimensionamento.

A iluminação natural por janelas é a solução mais comum e tem a característica de reduzir-se com o tamanho da janela e a profundidade do ambiente. As recomendações mais usadas por projetistas de 27 países para promover iluminação natural adequada enfocavam essas duas variáveis de projeto (REINHART e FITZ, 2006). A NBR/ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) é a norma brasileira específica para iluminação artificial e natural, mas essa norma não apresenta recomendações para tamanho de janela e profundidade de ambiente. O projeto de emenda à NBR15575-Desempenho (ABNT, 2021) pretende estipular o limite máximo de área de janela equivalente a 20% da área útil do recinto para iluminação natural aceitável e propõe admitir aberturas maiores, em função do sombreamento (PEREIRA et al, 2020). O limite de 20% da área de piso consta em publicações brasileiras como o máximo recomendado para iluminação com eficiência energética. Também, há a recomendação de manter a profundidade do ambiente limitada a uma vez e meia a altura da borda superior da janela (GONÇALVES; VIANNA; MOURA, 2011; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Referências estrangeiras recomendam manter a profundidade entre 1,5 e 2,0 vezes a altura da borda superior da janela (REINHART, 2005). Códigos de obras de cidades brasileiras como Brasília-DF, Natal-RN, Salvador-BA, Porto Alegre-RS, Florianópolis-SC, Rio de Janeiro-RJ adotam a razão 1/8 (12,5%) e 1/6 (17%), entre a área de janela e a área útil do recinto (FERNANDES, 2009). No entanto, essas recomendações não estão respaldadas em trabalhos científicos, nem acompanhadas de definição objetiva do que seria a esperada "iluminação natural adequada" (PEREIRA, SCHMITT; MORAES, 2015).

Estudos em outros países já mostraram que a profundidade limite da iluminação natural adequada varia com o tamanho da janela, tipo de sombreamento, transmitância do vidro, orientação da janela e parâmetro aplicado na análise do fenômeno (REINHART, 2005; TRISHA; AHMED, 2017). As recomendações votadas a essa questão precisam ter sua abrangência bem delimitada, devido a natureza multivariada da mesma. O tema já foi alvo de pesquisas no Brasil. Albuquerque e Amorim (2012) concluíram que a profundidade limite, com janela de área de 1/6 (17%) do piso, era de 2,57 vezes a altura da borda superior da janela, sem uso de sombreamento. O parâmetro utilizado para avaliar a iluminação natural foi autonomia com base em 60lx, em 70% do ano e em 70% do espaço. Essa pesquisa serviu de base para que o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012) adotasse a profundidade limite de 2,4 vezes a altura do topo da janela, como bonificação. Leader, Leal e Lima (2015) concluíram que, em residências no estado da Paraíba, uma janela representando 15% da área útil do recinto garante autonomia com base em 300lx em mais de 60% do ano e em mais de 70% do espaço, desde que não tenha sombreamento. Mas esses estudos avaliaram a iluminação natural sem considerar parâmetros de uniformidade na distribuição de iluminâncias e não avaliaram eficiência energética.

O método prescritivo do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (INMETRO, 2010) classifica a eficiência energética tão melhor quanto menor for o Percentual de Abertura na Fachada (PAF) e atribui um peso menor ao sombreamento. Ghisi, Tinker e Ibrahim (2005) concluíram que janelas menores e ambientes mais profundos reduzem o consumo com ar condicionado em edifício de escritório, contrariando limites recomendados pela literatura para iluminação natural adequada. Mas essas conclusões estavam baseadas em janela sem sombreamento. Estudo demonstrou que o sombreamento da janela por brises tem maior impacto na eficácia da iluminação natural e eficiência energética que o tipo de vidro usado na janela (LIMA; CARAM, 2015). Estudo para o município de Natal-RN concluiu que janela maior e sombreada apresenta menor consumo com ar condicionado (RODRIGUES; DIAS; PEDRINI, 2011). Lima e Caram (2015) concluíram que janela maior e sombreada, em Maceió-AL, apresenta melhor desempenho e consumo com ar condicionado, iluminação artificial e promove melhor iluminação natural. Esses resultados foram demonstrados mesmo com o estudo não considerando o efeito positivo da integração automatizada contínua entre iluminação natural e artificial, para a eficiência energética, como demonstrado por Rupp e Ghisi (2013). No entanto, esses estudos não buscaram identificar a razão janela/piso mais eficaz. O balanço eficiente entre essas variáveis é complexo de determinar, mas essencial para a boa iluminação natural com eficiência energética. Não há recomendações para a razão janela/piso em publicações brasileiras, que tenham baseado suas conclusões em iluminação útil, uniformidade, iluminação excessiva e eficiência energética, com iluminação híbrida e automática. Estudos

anteriores não responderam integralmente as questões envolvidas na definição da razão janela/piso mais eficaz para iluminação natural e eficiência energética. Esta pode contribuir para o aperfeiçoamento de recomendações em climas quentes, onde o sombreamento contínuo da janela é prioritário.

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo identificar a razão janela / piso, mais eficaz para iluminação natural e eficiência energética, considerando iluminância útil, uniformidade da iluminação, iluminância excessiva e consumo energético, na condição de janela sombreada, iluminação híbrida e uso de ar condicionado, em espaço de comércio e serviço, no trópico úmido do Brasil.

## 3. MÉTODO

O método consiste em uma análise comparativa do desempenho de modelos, quanto à iluminação natural e eficiência energética, em uma amostra de climas quentes e úmidos do Brasil. A análise se baseou em dados gerados por simulação computacional e no intervalo de desempenho de quatro grupos de modelos, por quatro parâmetros de desempenho.

### 3.1. Modelos usados nas simulações

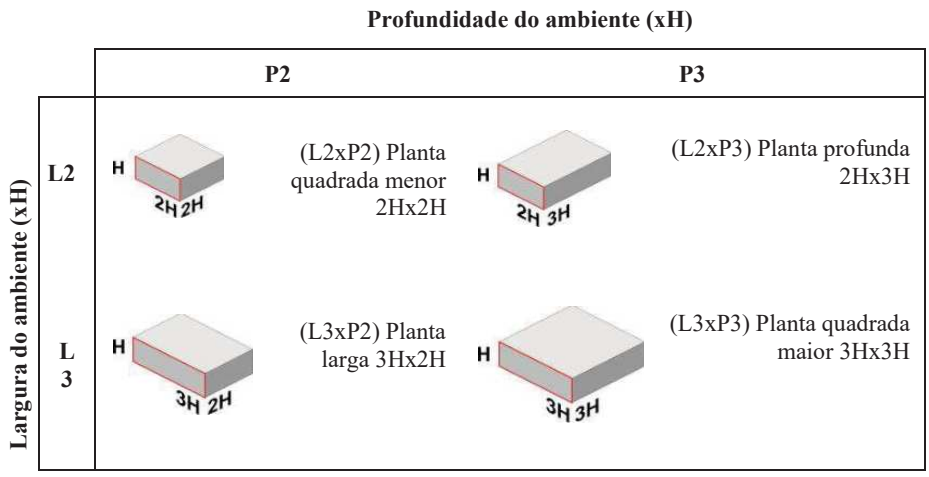
A norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) estabeleceu o Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Este define a Zona Bioclimática 8 (ZB8). Os limites dessa zona abrangem climas quentes e úmidos do Brasil. Esses climas possuem os céus mais luminosos, devido ao efeito combinado de alta radiação solar e umidade do ar. A variável Localização usou uma amostra de três climas quentes e úmidos, representados pelo arquivo climático de três municípios integrantes da ZB8 e situados no litoral da região Nordeste do Brasil: Fortaleza-CE (Lat. 4°S e Long. 38°O), Recife-PE (Lat. 9°S e Long. 35°O) e Salvador-BA (Lat. 13°S e Long. 64°O). Os arquivos climáticos usados nas simulações pertencem à base de dados *U.S.DOE / Weather* (U.S.DOE, 2018).

Os modelos comparados no presente estudo representam variações de uma sala de comércio e serviço, quanto a seis variáveis: profundidade e largura do recinto, tamanho, posição, orientação e visão de céu de janela. A Tabela 1 mostra uma síntese das variáveis e valores analisados. A amostra usada tem 240 modelos, formados pela combinação de valores. As demais características dos modelos foram mantidas constantes.

Tabela 1 – Variáveis e valores representados na amostra de 240 modelos.

| VARIÁVEL | VALORES | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Profundidade do ambiente** | **P2** (Duas vezes a altura topo da janela) | | | **P3** (Três vezes a altura do topo da janela) | |
| **Largura do ambiente** | **L2** (Duas vezes a altura do topo da janela) | | | **L3** (Três vezes a altura do topo da janela) | |
| **Tamanho da janela** | **J1** (1/3 da área da parede) | | | **J2** (2/3 da área da parede) | |
| **Orientação da janela (Azimute)** | 0° (norte) | 45° (nordeste) | 90° (leste) | 135° (sudeste) | 180° (sul) |
| **Visão de céu da janela (A.V.C.V.)** | 10° | | | 20° | |
| **Localização do modelo** | Fortaleza-CE | | Recife-PE | | Salvador-BA |

Tabela 2 – Formatos de planta, a partir da combinações de Largura e Profundidade.




Os dois valores adotados para as variáveis Profundidade e Tamanho representam o que está em acordo e o que está além dos limites recomendados na literatura técnica, nacional e internacional. Os valores nas variáveis Largura (L2 e L3) e Profundidade do ambiente (P2 e P3) foram combinados para gerar quatro formatos de planta nos modelos da amostra, como aparece na Tabela 2.

A altura do teto nos modelos é de 3m e está representada pela letra "H". O valor nas variáveis Largura e Profundidade está definido como múltiplo de "H". Essa definição relativa das dimensões dos modelos permite que eles representem ambientes com diferentes dimensões absolutas, já que a escala do modelo não afeta a iluminação natural. O valor P2 está próximo ao limite de profundidade da zona de iluminação natural, como indicado em publicações nacionais e internacionais (REINHART, 2005; GONÇALVES; VIANNA; MOURA, 2011; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). O valor P3 representa um valor de profundidade que está além do limite recomendado.

A janela unilateral nos modelos tem formato horizontal, com largura igual a do ambiente, posicionada acima do plano de trabalho e junto ao teto. Isso mantém a altura da borda superior da janela igual ao pé-direito do recinto. Os dois tamanhos de janela (J1 e J2) são soluções convencionais, que tem área efetiva para iluminação equivalendo respectivamente a 1/3 (33%) e 2/3 (66%) da área da parede. A área absoluta da janela nos modelos variou em função da largura do ambiente, já que a largura da janela foi mantida sempre igual a do ambiente. Os dois tamanhos usados afetaram a posição da janela na parede, gerando os dois padrões descritos na Tabela 3. Cada padrão tem características próprias sobre provisão de vista do exterior e risco de ofuscamento. O padrão clerestório (J1) é frequentemente usado sobreposto a uma janela convencional, que pode permanecer obstruída por brises ou persianas. Nesses casos, o clerestório se encarrega da iluminação natural, deixando a janela abaixo encarregada apenas de prover ventilação e vista do exterior.

Tabela 3 - Opções de tamanho da janela contidas na amostra de modelos.

| Tamanho | Descrição |
|---|---|
| 1/3 **J1** | Clerestório com área efetiva para iluminação equivalente a 1/3 da área da parede, posicionado junto ao teto. Esse padrão tem menor probabilidade de ofuscamento, mas não provê vista significativa do exterior. Ele proporciona uma iluminação mais uniforme, em maior profundidade que janelas convencionais. |
| 2/3 **J2** | Combinação de janela convencional e clerestório, com área efetiva para iluminação equivalente a 2/3 da área da parede. Esta janela provê vista significativa do exterior, mas tem maior probabilidade de ofuscamento. A iluminância média tende a ser mais alta com ela, mas as iluminâncias excessivas também. |

Tabela 4 – Razão entre área efetiva de iluminação da janela e área útil do ambiente (piso), gerados pela combinação de profundidade e tamanho de janela.

| | Tamanho de janela | |
|---|---|---|
| **Profundidade** | **J1** | **J2** |
| **P2** | 0,17 ou 1/6 | 0,33 ou 2/6 |
| **P3** | 0,11 ou 0,9/8 | 0,22 ou 1,8/8 |




Figura 1 - Máscaras de sombra da janela dos modelos, nas orientações norte, leste, sul e na localização de Salvador-BA.

A combinação dos dois tamanhos de janela (J1 e J2) com os dois valores de profundidade (P1 e P2) geraram quatro valores para a razão janela/piso, como aparece na Tabela 4. A largura do ambiente não afetou essa razão, já que essa largura do ambiente foi sempre igual à largura da janela, nos modelos da pesquisa.

O sombreamento da janela é contínuo no horário entre 8h e 17h, por meio de protetor externo, fixo, misto, simples, de cor clara e reflexão difusa.

O ângulo vertical externo de sombreamento das janelas foi fixado em 25°, nos protetores. Essa solução proporcionou sombreamento contínuo da janela entre 8h e 17h, para todas as combinações das variáveis Localização do modelo e Orientação da janela. O presente estudo adotou as orientações norte, nordeste, leste, sudeste e sul, evitando o "poente", para permitir proteção com menor obstrução do céu. Exemplos de sombreamento nas orientações norte, leste e sul, são mostrados na Figura 1, para a carta solar do município de Salvador-BA. Os dois analemas destacados na carta solar representam os horários 8h e 17h. Há uma incidência de sol na orientação norte, próximo às 17h, nos meses de outono e inverno. Mas o sol não alcançou o plano de trabalho nas simulações, devido ao ângulo de incidência do sol na janela, nesse per.

A opção por manter o elemento de sombreamento constante em diferentes localizações e orientações permitiu manter a independência entre as variáveis Localização, Orientação e Ângulo Vertical de Visão de Céu (A.V.C.V.). Isso tornou a análise dos resultados menos incerta. Ainda assim, os ângulos horizontais externos de sombreamento da janela variaram de 47° a 70°, em função da variável Largura, mesmo com a adaptação utilizada, como pode ser visto na Figura 2. Mas o sombreamento se manteve continuo no horário entre 8h e 17h.

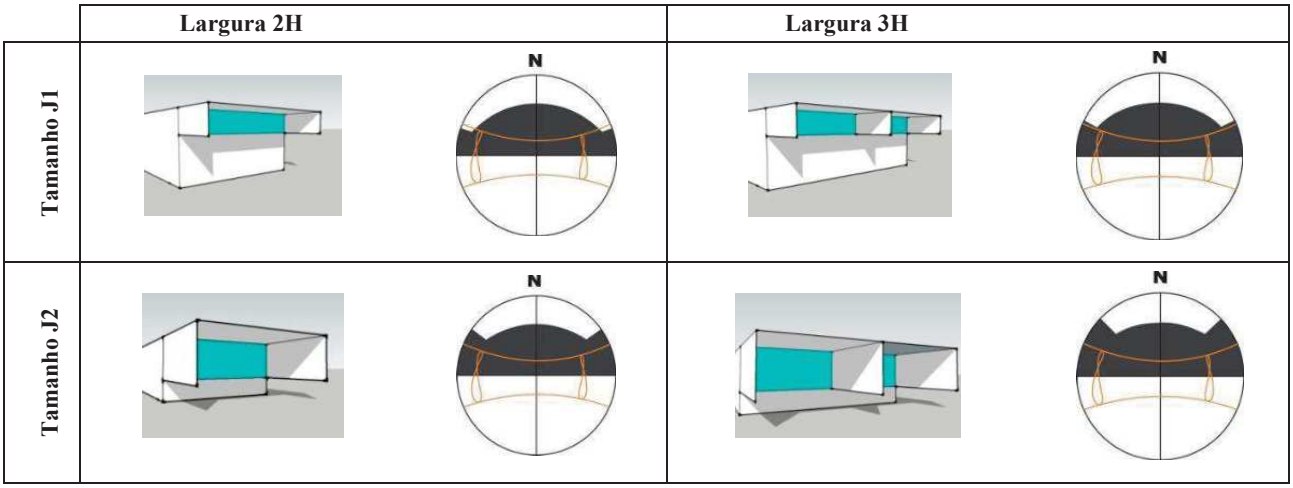



Figura 2 – Máscara de sombra para modelos com largura de 2H e 3H e janela com tamanho J1 e J2. Pode-se perceber a variação dos ângulos horizontais externos de sombreamento, em função da largura do modelo.

A variável Visão de Céu da Janela foi expressa pelo Ângulo Vertical de Céu Visível (A.V.C.V.), definido como a diferença entre o ângulo vertical externo de sombreamento e o ângulo vertical externo de obstrução pelo entorno. Os dois valores nessa variável foram 10° e 20°. Estes representam uma condição menos favorável à iluminação natural, mas que é frequente com janela sombreada, em áreas urbanas. Esses ângulos podem ser visto na Figura 3. A variação de A.V.C.V. foi promovida apenas pela alteração do ângulo vertical de obstrução do entorno, já que o ângulo de sombreamento vertical frontal externo foi mantido fixo em 25°. A alteração do ângulo de obstrução foi feita modificando a altura do plano vertical externo, que representava o entorno construído. Esse plano ficava a dez metros de distância da fachada e se projetava 10m, além das extremidades laterais da fachada do modelo, formando ângulos horizontais externos de obstrução de 45°. Isso pode ser visto na Figura 3. Esse plano externo foi configurado com refletância de 0,5.

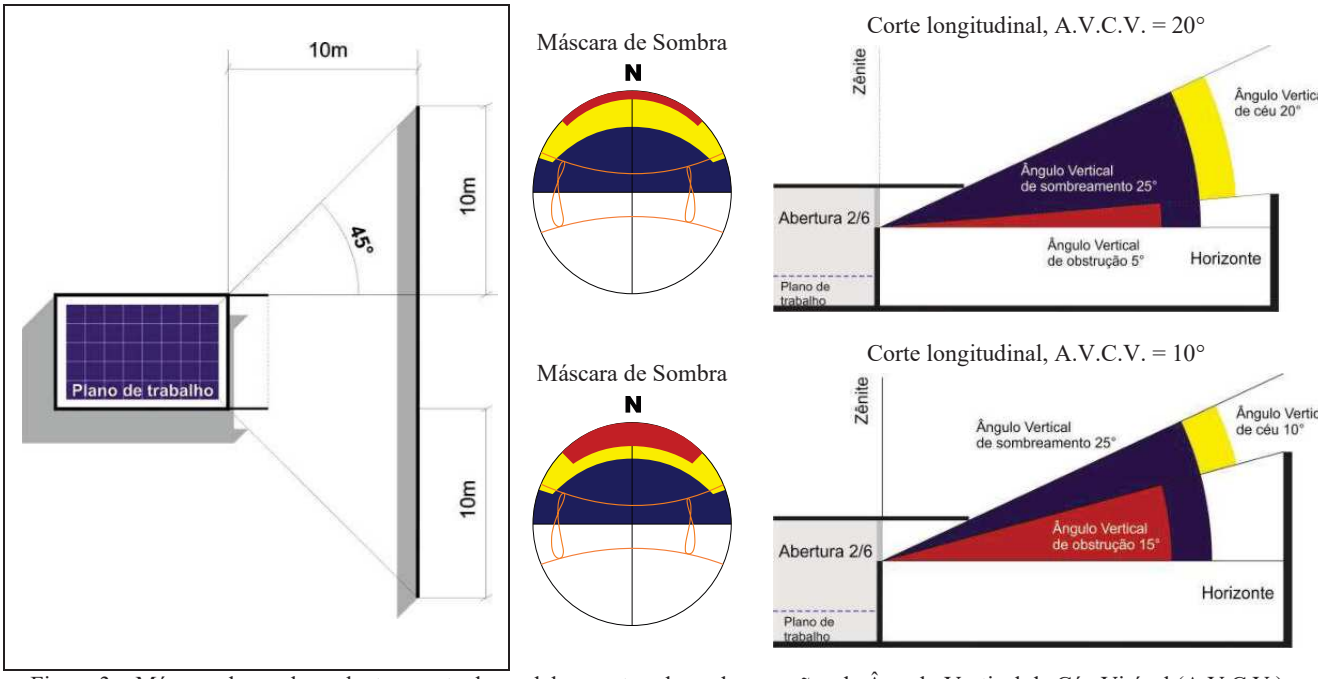



Figura 3 – Máscara de sombra, planta e corte de modelo, mostrando as duas opções de Ângulo Vertical de Céu Visível (A.V.C.V.).

### 3.2. Simulação computacional

Os indicadores de desempenho da iluminação natural foram obtidos a partir das iluminâncias simuladas com a ferramenta *Daysim*, baseada em *Radiance Raytracing*, Coeficientes de Luz Natural e Modelos de Céu de Perez (REINHART, 2010). Essa ferramenta foi validada por Reinhart e Walkenhorst (2001). Os dados de consumo final de energia com ar condicionado e luz elétrica foram obtidos com o programa *DesignBuilder* (DESIGNBUILBER, 2011), baseado em *EnergyPlus*. Ambas as ferramentas são recomendadas pelo regulamento RTQ-C (INMETRO, 2010). O presente trabalho optou por simular consumo de energia no *EnergyPlus*, usando rotinas de operação do sistema de iluminação geradas pelo *Daysim*, como em Didoné e Pereira (2011), Rupp e Ghisi (2013) e Lima e Caram (2015).

Algumas configurações foram comuns a todas as simulações com a ferramenta *Daysim*. A Complexidade de cena foi configurada como baixa, usando a opção "Cena 1", que tem o menor tempo de processamento e pode ser usada quando as proteções solares são simples. As ilumiâncias foram simuladas para um plano de trabalho com altura de 0,75m acima do piso e uma malha de pontos abrangendo todo o ambiente com 1m de distância entre os pontos da malha e 0,5 de distância das paredes. O interior dos modelos era claro, com refletância média de 0,65, correspondendo às refletâncias: teto 0,8, paredes 0,7, piso 0,5. O sistema iluminação artificial tinha densidade de potência de 10W/m², de acordo com simulação realizada com a ferramenta *ReluxPro* (AG, 2011), luminária *Osram Ledvance Downlight* XLWT 930 L60 DALI, de 28W de potência, para iluminância de projeto de 500lx. O RTQ-C classifica o nível de eficiência desse sistema com a etiqueta "A" (INMETRO, 2010). A rotina de ocupação nas simulações totalizava 2.610 horas por ano e abrangia o horário de 8h00m às 18h00m, sem intervalos, nos dias de segunda à sexta-feira. O sistema de iluminação era híbrido e controlado de modo contínuo, por dimmer, no horário de funcionamento. A iluminação artificial era acionada apenas quando as iluminâncias ficavam abaixo de 300lx, funcionando com potência parcial de pelo menos 20%, para complementar as iluminâncias até 300lx. A iluminação artificial era desativada quando todas as iluminâncias se mantinham acima de 300lx. O comportamento do usuário foi configurado no modo "Usuário Ativo", para controle de persianas, que não podiam ser desativadas. No padrão "Usuário Ativo", elas são baixadas apenas se uma irradiância solar de 50W/m² incide em algum ponto da malha no plano de trabalho, voltando a ser suspensas ao cessar essa incidência (REINHART, 2010). No entanto, o padrão não operou as persianas em nenhuma das simulações, pois não houve incidência de sol no plano de trabalho, devido ao sombreamento contínuo da janela.

Algumas configurações foram comuns a todas as simulações com a ferramenta *DesignBuilder*. O Sistema de ar condicionado tinha temperatura de *setpoint* de 25°C e Coeficiente de Performance 3 (COP 3). A janela dos modelos permanecia fechada e tinha um único pano de vidro incolor, de transmitância visível de 0,85. Esse vidro foi representado pelo padrão *Asahimas Indoflot Clear* 10,0 <FL10.amg, que consta na biblioteca de vidros do programa *DesignBuilder* e tem coeficiente de ganho de calor solar de 0,756 e transmitância térmica de 5,67 W/m²-k. A envoltória do modelo é leve, formada por paredes de 15cm de transmitância térmica de 2,48W/m²K, capacidade térmica 159kJ/m²K e refletância 0,89. Essas paredes foram combinadas com cobertura de transmitância térmica 2,95W/m²K, capacidade térmica 167kJ/m²K e refletância 0,89. As Densidades de potência para ocupantes e equipamentos foram mantidas iguais a zero, equivalendo a um espaço desocupado. A opção por manter essas densidades assim teve o intuito de manter o foco da análise na relação entre o edifício e o desempenho, em vez da relação entre o padrão de uso do edifício e o seu desempenho.

### 3.3. Análise de dados

Os procedimentos descritos geraram dados de iluminância e consumo de eletricidade com iluminação híbrida e ar condicionado, para os modelos da amostra. As iluminâncias foram usadas no cálculo de três indicadores de desempenho da iluminação natural. Os dados de consumo foram usados para comparar a eficiência energética dos modelos.

Os três indicadores de desempenho da iluminação natural são dinâmicos e abordam respectivamente aspectos distintos: iluminação suficiente, uniformidade e iluminação excessiva. A análise adotou como primeiro indicador a frequência anual de iluminâncias no intervalo útil entre 300lx e 3.000lx, que representa iluminação natural autônoma, efetiva ou tolerável (MARDALVEJIC et al, 2011). Esse indicador é afetado pela média anual das iluminâncias, mas não tem relação com a uniformidade. O desempenho é tão melhor quanto maior for essa frequência. A análise adotou como indicador de uniformidade a razão entre a maior e menor autonomia da iluminação natural, com base em 300lx (REINHART; WEISMANN, 2012). Esse indicador é afetado pela uniformidade da iluminação durante o ano, mas não tem relação com a média anual das iluminâncias. O desempenho é tão melhor quanto maior for o valor dessa razão.

A análise adotou a frequência anual de iluminâncias acima de 3.000lx para indicar iluminação excessiva (MARDALVEJIC et al, 2011). Esse indicador é afetado pela média anual das iluminâncias e está associado à probabilidade de ofuscamento. O desempenho é tão melhor quanto menor for essa frequência.

Os procedimentos de análise no presente estudo compararam o intervalo de variação do desempenho em quatro grupos de modelos, classificados segundo sua razão janela/piso. Essa comparação foi feita com base em cada indicador de desempenho. Esse procedimento buscou identificar qual razão janela/piso alcança os melhores desempenhos, apesar do efeito das outras variáveis. A magnitude da variação do desempenho em cada agrupamento deve-se ao efeito dos diferentes valores de largura do ambiente, orientação e visão de céu da janela, localização do modelo. Intervalos de variação mais restritos indicam menor sensibilidade às demais variáveis. Essa característica é relevante para abrangência de aplicação e validade de recomendações de pré-dimensionamento.

## 4. RESULTADOS

A apresentação dos resultados está dividida em desempenho luminoso e eficiência energética, seguindo a sequência dos quatro indicadores adotados na avaliação:

a) Frequência anual de iluminâncias no intervalo útil entre 300lx e 3000lx;
b) Razão entre a menor e a maior autonomia da iluminação natural, com base em 300lx;
c) Frequência anual de iluminâncias no intervalo acima de 3000lx.
d) Consumo final anual com ar condicionado e iluminação híbrida.

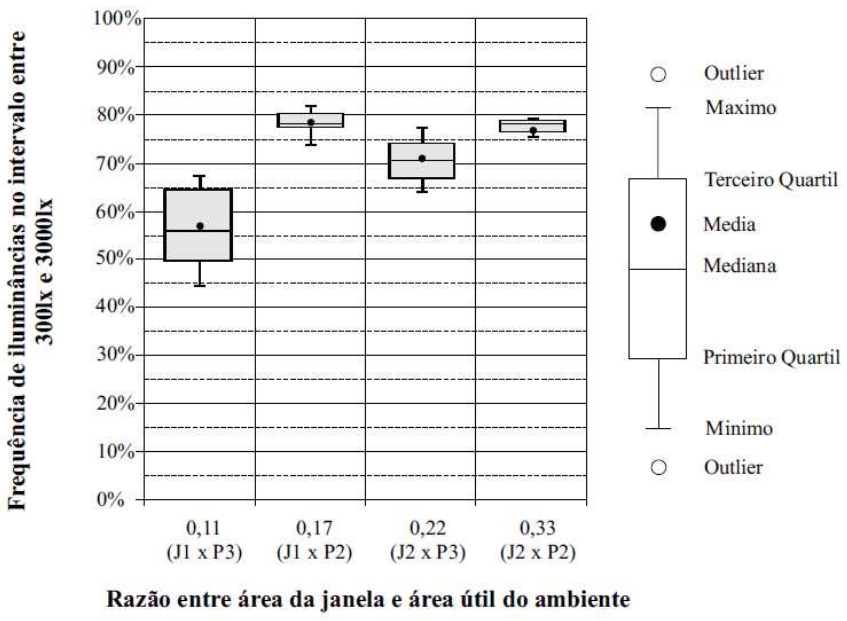



Figura 5 - Frequência de iluminâncias no intervalo entre 300lx e 3000lx, para os 240 modelos da amostra, agrupados pela razão janela / piso.

Os dados de frequência anual de iluminâncias no intervalo entre 300lx e 3000lx, nos 240 modelos, aparecem no gráfico da Figura 5, agrupadas segundo a razão janela/piso. Essas frequências anuais são indicador de iluminação autônoma, efetiva ou tolerável. Os dados mostraram que os melhores desempenhos foram alcançados pelos dois grupos com profundidade menor (*P2), representados pelas razões 0,17 e 0,33. As frequências anuais ficaram acima de 70% e com os menores intervalos de variação, com o grupo J2xP2 variando apenas entre 75% e 80%. A profundidade "P2" foi determinante para esse resultado.

O grupo J1xP2, é representado por 0,17 (1/6). Essa razão já é frequentemente recomendada em códigos de obras de municípios brasileiros, para promover iluminação natural adequada. No entanto, é relevante que os desempenhos do grupo J2xP2, representado pela razão 0,33 (2/6), tenham estado também entre os melhores, já que essa combinação tem janela ocupando 2/3 (66%) da área da parede e esse tamanho está além do que a literatura recomenda para iluminação eficiente. Isso pode ser explicado pelo efeito do sombreamento da abertura na iluminação natural (LIMA; CARAM, 2015), que provavelmente foi desconsiderado na proposição das recomendações correntes.

Entre os dois grupos com maior profundidade (*P3), os melhores desempenhos e a menor variação ocorreu com o grupo J2xP3 (0,22), que apresentou frequências anuais acima de 60%, um desempenho intermediário, apesar da profundidade de três vezes a altura do topo da abertura. Essa profundidade está além dos limites recomendados e os desempenhos do grupo J1xP3 (0,11) foram consideravelmente inferiores, mostrando frequências abaixo de 50%. Nesses dois grupos, o tamanho de janela "J2" determinou a diferença entre eles.

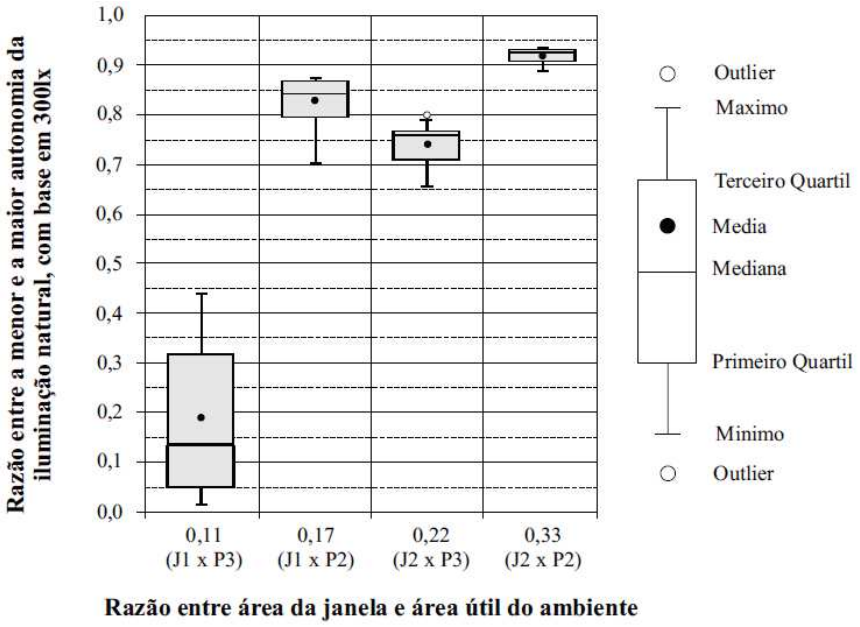



Figura 6 - Razão entre a menor e maior autonomia da iluminação natural, com base em 300lx, nos 240 modelos da amostra, agrupados pela razão janela / piso.

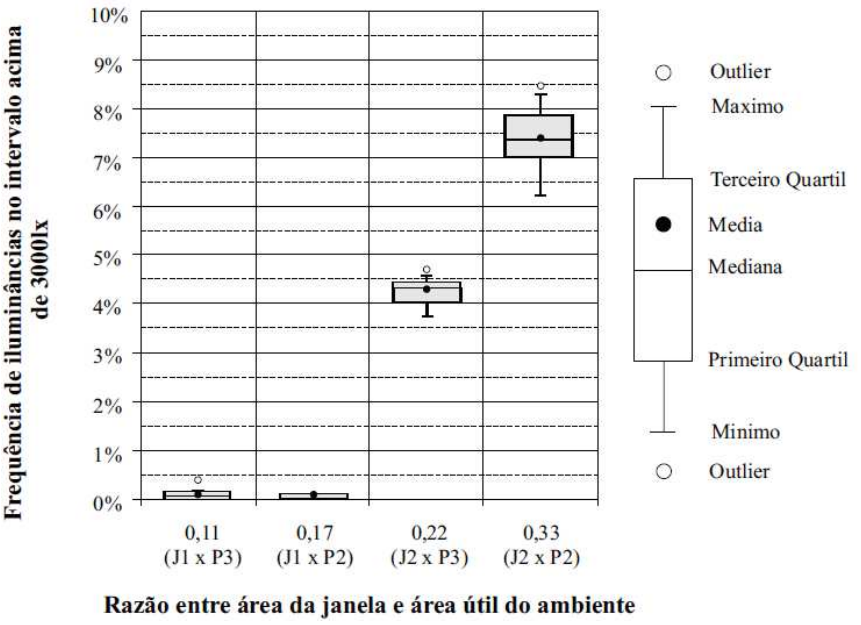



Figura 7 - Frequência de iluminâncias no intervalo acima de 3000lx, nos 240 modelos da amostra, agrupados pela razão janela/piso.

O gráfico da Figura 6 mostra valores da razão entre a maior e a menor autonomia da iluminação natural, com base em 300lx, para os 240 modelos, agrupados pela razão janela/piso. Esse parâmetro foi usado como indicador de uniformidade de distribuição das iluminâncias. Os dados mostraram que o grupo J2xP2, representado pela razão 0,33, teve os melhores desempenhos e a menor variação. Os desempenhos nesse grupo ficaram acima de 0,85 e dos demais grupos. Entre os dois grupos com maior profundidade (*P3), o grupo J2xP3 (0,22) teve desempenhos melhores e acima de 0,65, com menor variação e acima do grupo J1xP3, que teve desempenhos abaixo de 0,45. O tamanho de janela maior "J2" foi determinante para o resultado nesses dois grupos.

Os dados de frequência anual de iluminâncias acima de 3000lx são mostrados no gráfico da Figura 7. O desempenho dos grupos com janela menor (J1*) tiveram desempenhos melhores que os grupos com janela maior (J2*), independendo da profundidade. No entanto, mesmo os piores desempenhos nesse teste, foram representados por frequências anuais abaixo de 10%, o que pode ser considerado tolerável (MARDALVEJIC et al, 2011).

Os dados de consumo de energia para ar condicionado e iluminação híbrida são apresentados na Figura 8. Esses dados mostraram que o grupo J2xP2 (0,33) apresentou os menores consumos e o menor intervalo de variação. Embora, os desempenhos nos grupos J1xP2 (0,17) e J2xP3 (0,22) tenham ficado relativamente próximos a eles. O resultado mais relevante é que entre os menores consumos estão modelos com a maior janela "J2" e menor profundidade P3". Isso difere das conclusões de Ghisi, Tinker e Ibrahim (2005) e concorda com as conclusões de Rodrigues, Dias e Pedrini (2011). O sombreamento da abertura foi determinante para essa diferença. É relevante que modelos com a maior janela tenham estado entre os menores consumos energéticos, já que janelas ocupando 2/3 da área da parede contrariam recomendações correntes, que não mencionam a condição de sombreamento da janela.

Uma síntese do resultado geral aparece na Tabela 5, considerando os quatro indicadores. Os melhores desempenhos ocorreram no grupo J1xP2 (0,17), pelos quatro indicadores. O grupo J2xP2 (0,33) teve também os melhores desempenhos, com exceção para o terceiro indicador (iluminação excessiva). O terceiro melhor desempenho correspondeu ao grupo J2xP3 (0,22), pelos quatro indicadores. O grupo J1xP3 (0,11) teve o pior desempenho em três dos quatro indicadores, com exceção para o terceiro.

## 5. CONCLUSÕES

A avaliação pelos quatro indicadores mostrou que a razão 0,17 (1/6) é eficaz e isso ratifica uma recomendação frequentemente em códigos de obras de municípios brasileiros. No entanto, a razão 0,33 (2/6) também apresentou os melhores desempenhos, apesar de estar associada às maiores frequências de iluminação excessiva (>3000lx). Ainda assim, essas frequências anuais ficaram abaixo de 10% e o resultado dessa razão pelo indicador de uniformidade foi o melhor. A razão 0,33 corresponde a janelas ocupando 2/3 da área da parede, o que está além do limite recomendado na literatura para iluminação natural eficiente. Os modelos com profundidade equivalendo a três vezes a altura da borda superior da janela apresentaram desempenho aceitável, mas apenas quando combinados com janela ocupando 2/3 da parede, combinação representada pela razão janela/piso 0,22 ou 1,8/8. Essa profundidade está além de limites recomendados na literatura. Assim, a razão 1,8/8 poderia ser recomendada alternativamente, para permitir recintos mais profundos, admitindo um desempenho intermediário. A razão 1/8 (0,125) é recomendada em códigos de obras em municípios brasileiros. O presente estudo avaliou a razão 0,11 (0,9/8) e esta apresentou os piores desempenhos, com exceção apenas quanto à iluminação excessiva.

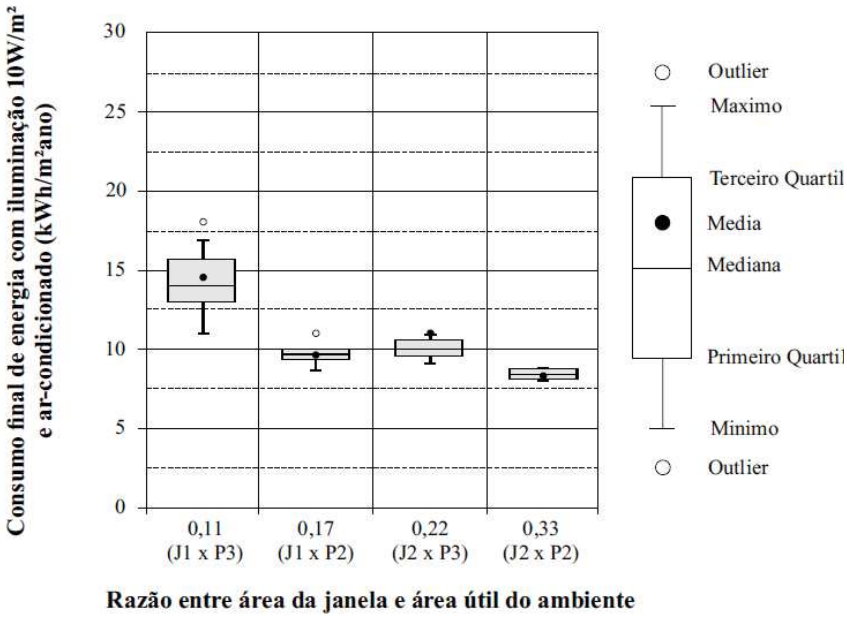



Figura 8 - Consumo com iluminação e ar condicionado.

Tabela 5 – Síntese da análise pelos quatro agrupamentos e quatro indicadores.

| | Indicadores | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Grupo** | **1°** | **2°** | **3°** | **4°** | | **LEGENDA** |
| **(J1 x P3) 0,11** | ☹ | ☹ | ☺ | ☹ | ☺ | Melhor desempenho |
| **(J1 x P2) 0,17** | ☺ | ☺ | ☺ | ☺ | ☺ | Segundo melhor desempenho |
| **(J2 x P3) 0,22** | ☺ | ☺ | ☺ | ☺ | ☺ | Terceiro melhor desempenho |
| **(J2 x P2) 0,33** | ☺ | ☺ | ☹ | ☺ | ☹ | Pior desempenho |

O procedimento usado na identificação de recomendações de pré-dimensionamento analisou os desempenhos em grupos e por meio do intervalo de variação. Isso permite que as recomendações proposta sejam aplicadas de modo abrangente, dentro dos limites do estudo. Esses limites são representados pelos valores extremos adotados nas variáveis e pelas constantes assumidas nos modelos. Nessas condições de contorno, janela maior gerou maiores frequências de iluminação útil, independendo da profundidade. A combinação de janela maior com menor profundidade gerou maior uniformidade da iluminação. Janela menor gerou menos iluminação excessiva, independendo da profundidade. Janela maior gerou menor consumo de energia, efeito mais notável na maior profundidade. Trabalhos futuros irão aplicar o mesmo método, na avaliação do efeito de diferentes climas, padrões de geometria, janela e sombreamento, na eficácia da razão janela/piso. Ainda assim, o presente trabalho mostrou limitações em recomendações correntes na literatura e abordou aspectos ignorados em pesquisas anteriores. Espera-se com isso contribuir para o aperfeiçoamento de recomendações de pré-dimensionamento para climas quentes. Essas recomendações são importantes para dar suporte a decisões do arquiteto durante a etapa preliminar do projeto, a fim de alcançar maior eficiência energética com aproveitamento eficaz da luz natural. Recomendações influenciam consideravelmente o ensino, a prática e a avaliação de projeto arquitetônico, podendo induzir à redução da demanda energética nos edifício.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações: Parte 3 - Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR/ISO/CIE 8995-1:** Iluminação de ambientes de trabalho: Parte 1: Interior. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **CB 002 NBR 15575-4:** Projeto de emenda: Parte 4: Requisitos para sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2021.

AG, R. I. **Relux Professional**.Disponível em:< https://reluxnet.relux.com/en/downloads.html> Acesso em: 2011.

ALBUQUERQUE, M. S. C. D.; AMORIM, C. N. D. Iluminação natural: indicadores de profundidade-limite de ambientes para iluminação natual o Regulameto Técnnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais-RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 2, p. 10, 2012.

DESIGNBUILDER, S. L. **DesignBuilder**.**v2.2.5.004**. DesignBuilder Software Ltda, 2000-2009. Disponível em: <https://designbuilder.co.uk//> Acesso em: 2011

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Integrated Computer Simulation for Considering Daylight when Assessing Energy Efficiency in Buildings: In: Twelveth International IBPSA Conference, XII, 2011.Sidney. IBPSA. **Proceedings.** Sidney, IBPSA, 2011.

FERNANDES, J. T. **Código de obras e edificações do DF**: inserção de conceitos bioclimáticos, conforto térmico e eficiência energética. (2009). 249 f. Dissertação (Mestrado). Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília-Unb, Brasília, 2009.GALASIUS, A. D.; REINHART, C. Current daylighting design practice. **Building Research and Information**, v. 36, n. 2, 2007.

GONÇALVES, J. C.; VIANNA, N. S.; MOURA, N. C. D. S. **Iluminação Natural e Artificial**. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2011.

GHISI, E.; TINKER, J. A.; IBRAHIM, S. H. Área de janela e dimensões de ambiente para iluminação natural e eficiência energética: literatura versus simulação computacional. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 4, p. 81-93, 2005.

INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos RTQ-C**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais RTQ-R**. Rio de Janeiro, 2012.

LAMBERTS, R.; PEREIRA, F. O. R.; DUTRA, L. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014.

MARDALJEVIC, J. et al. Daylighting metrics for residential buildings. In: Session of the CIE. 2011, Sun City. **Proceedings**. Sun City, CIE, 2011.

LEDER, S. M.; LEAL, L. D. Q.; LIMA, E. F. C. Percentual de abertura na fachada e tipo de fechamento no desempenho lumínico da edificação In: Encontro Nacional e Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, XIII Encac e IX Elacac, 2015, Campinas. **Anais**. Campinas, Antac, 2015. p.

LIMA, K. M. D.; CARAM, R. M. Avaliação de sistema de janela para suporte a decisões de projeto quanto ao equilíbrio de ganhos de luz e calor. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 117-133, 2015.

MATOS, J. C. D. S. F.; SCARAZZATO, P. S. A iluminação natural no projeto de arquitetura: revisão sistemática da literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, n. 4, p. 7, 2017.

PEREIRA, F. O. R.; SCHMITT, M.; MORAES, L. N. Zoneamento luminoso do território brasileiro através de histogramas de frequência acumulada de ocorrência de iluminâncias horizontais difusas externas In: Encontro Nacional e Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, XIII ENCAC e IX ELACAC, 2015, Campinas. **Anais**. Campinas, Antac, 2015. p.

REINHART, C. A simulation-based review of the ubiquitous window-head-height to daylit zone depth rule-of-thumb. In: International IBPSA Conference. IX, 2005, Montreal. **Proceedings**. Montreal, IBPSA, 2005.

_____. **Tutorial on the use of daysim simulations for sustainable design**. 2010.

REINHART, C.; FITZ, A. Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design. **Energy and Buildings**, v. 38, p. 11, 2006.

REINHART, C.; WALKENHORST, O. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. **Energy and Buildings**, v. 33, p. 283-297, 2001.

REINHART, C. F.; WEISSMAN, D. A. The daylit area: correlating architectural student assessments with current and emerging daylight availability metrics. **Building and Environment**, v. 50, p. 2012.

RODRIGUES, DIAS, PEDRINI. Grandes aberturas, porém sombreadas: análise da caracterização do sombreamento visando à eficiência energética para o clima quente e úmido: In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído ENCAC, XI, 2011, Búzios. **Anais**. Búzios, ANTAC, 2011.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica através do uso de luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 75-86, 2013.

TRISHA, S. H.; AHMED, Z. N. A review of the daylight rule of thumb: assesssing window head height to daylit zone depth for shading devices in comercial buildings In: International Conference on Green Architecture, 1° ICGrA, 2017, Dhaka. **Procedings**. Grace, Department of Architecture, Buet, 2017. p. 25-32.

U.S. DOE. **EnergyPlus / Weather**. U.S. DOE. 2009. Disponível em: <https://energyplus.net/weather> acesso em: 2018.

VENÂNCIO, R. **Modos projetuais de simulação**: uso de ferramentas de simulação térmica no processo projetual de arquitetura. 2012. Tese (Doutorado). Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte UFRN. 2012.