

Suelem Schier de
França
Raphaela Walger da
Fonseca
Fernando Oscar
Ruttkey Pereira

M

ÉTODOSIMPLIFICADO BASEADO
NA DISPONIBILIDADE DE LUZ
DIFUSA PARA ESTIMAR O
POTENCIAL ENERGÉTICO DO
APROVEITAMENTO DA LUZ
NATURAL EM EDIFICAÇÕES

pós- | I

Este trabalho verificou o potencial da utilização do Fator de Luz Diurna temporal para a estimativa do consumo de iluminação de ambientes com diferentes volumetrias, tipos de aberturas e distribuição de fotosensores¹. Tal potencial foi verificado frente à simulação computacional anual baseada no clima, por meio de um estudo de caso para Florianópolis. Avaliaram-se seis cenários paramétricos cujas variações contemplaram a profundidade do ambiente, o tamanho da abertura e a área de atuação dos fotosensores. O método assume a premissa de que um único ponto de análise, associado à zona de controle do fotosensor e localizado na parcela da zona mais distante da abertura, é adotado para estimar o consumo de iluminação. A escolha desse ponto mostrou-se válida, dependendo da profundidade da área de abrangência do sensor e do tamanho da janela. Em geral, os resultados subestimaram o aproveitamento da luz natural. Concluiu-se que o método tem potencial para ser aplicado com erros de ~10%, definindo-se uma área mínima de abertura e limitando-se a profundidade das zonas em ~1,5 X a altura da verga. Assim, recomenda-se como trabalhos futuros a sua validação com base em um maior número de variáveis.

¹ Neste trabalho, o termo fotosensor foi utilizado para caracterizar dispositivos de controle do sistema de iluminação em função da luz natural.

PALAVRAS-CHAVE

Iluminação natural. Método simplificado. Componente difusa. Consumo de iluminação.



SIMPLIFIED METHOD BASED ON THE DIFFUSE LIGHT AVAILABILITY TO ESTIMATE THE BUILDINGS DAYLIGHT HARVESTING POTENTIAL

ABSTRACT

This work verified the potential of using the temporal Daylight Factor to estimate the lighting energy consumption of environments with different volumetries, types of openings and distribution of photosensors. Such potential was verified against the annual computer simulation based on climate, through a case study for Florianópolis. Six parametric scenarios were evaluated, whose variations included the depth of the environment, the size of the opening and the operation area of the photosensors. The method assumes that a single point of analysis, associated with the control zone of the photosensor and located in the portion of the zone furthest from the opening, is adopted to estimate lighting energy consumption. The choice of this point proved to be valid, depending on the depth of the sensor's coverage area and the window size. In general, the results underestimated the daylight use. It was concluded that the method has the potential to be applied with errors of ~10%, defining a minimum opening area and limiting the depth of the zones to ~1.5 X the height of the lintel. Thus, it is recommended as future work to validate it based on a greater number of variables.

KEYWORDS

Daylighting. Simplified method. Diffuse daylight illuminance. Lighting energy consumption.

I. INTRODUÇÃO

A iluminação natural se destaca pelo seu potencial qualitativo e energético. Quanto ao aspecto qualitativo, as boas condições de iluminação podem aumentar a produtividade e o conforto dos usuários das edificações, com comprovada preferência dos mesmos por ambientes iluminados naturalmente (EDWARDS; TORCELLINI, 2002; MAYHOUB; CARTER, 2011). Soma-se o seu impacto na saúde dos ocupantes, devido aos efeitos não visuais da luz no ciclo circadiano, que regula uma ampla gama de funções comportamentais e fisiológicas (KONIS, 2019).

O potencial energético do aproveitamento da iluminação natural por meio da redução do uso do sistema de iluminação e de ar-condicionado é um tema consolidado. O século XXI foi marcado pela difusão dos LEDs, consistindo em um importante avanço para a eficiência energética de edificações. Entretanto, ainda existem incertezas quanto à qualidade desses sistemas, tanto em relação à luz ofertada, quanto à sua durabilidade e, conseqüentemente, à sua real eficiência. Assim, o aproveitamento da iluminação natural não deve ser desperdiçado, em especial pelo seu potencial de redução da demanda de pico. Mesmo os países mais avançados na regulação da qualidade dos sistemas LED incentivam o aproveitamento da luz natural (TITLE 24, 2019). Isso porque o sistema de iluminação ainda é responsável por cerca 1/3 do consumo energético de edificações comerciais e varia entre 1/3 e 1/8 nas residências, dependendo do tipo de aquecimento de água (CEC, 2019).

Para otimizar o aproveitamento energético da luz natural, deve-se considerar os fatores relacionados à implantação da edificação, como condicionantes climáticas e de obstruções do entorno, e os inerentes à própria arquitetura e ao projeto luminotécnico. Quanto ao projeto luminotécnico, a setorização do sistema de iluminação, de acordo com a disponibilidade de luz natural em si, já apresenta grande potencial de economia de energia, permitindo que o usuário possa operar tal sistema em consonância com a oferta de luz natural. O emprego de sistemas de controle fotossensíveis reduz o tempo de uso ou a potência acionada, baseados em dados medidos em tempo real. Independentemente do tipo de controle, manual ou automático, a integração entre ambos os sistemas de iluminação, natural e artificial, é fundamental. Assim, torna-se necessário conhecer o comportamento da luz natural no ambiente e definir as zonas com potencial para a integração (ROCHA, 2012). Um dos motivos pelos quais os sistemas de controle não são considerados efetivos é a sua aplicação inadequada, com pouco critério para a definição de como e onde deve ser feita a sua instalação (ROCHA, 2012).

Parise *et al.* (2016) mostraram uma variação de até 50% no consumo de iluminação ao experimentar diferentes cenários luminotécnicos para o mesmo espaço interno, variando apenas o modo de acionamento e os arranjos dos fotosensores. No mesmo contexto, Moraes (2012) obteve um potencial de economia de energia de 46% em função da integração entre os sistemas, enquanto Rocha obteve 62%.

A caracterização do desempenho luminoso das edificações é complexa, uma vez que a interação entre o clima e a arquitetura envolve fenômenos dinâmicos. Atualmente, a modelagem da luz natural baseada no clima (CBDM) é o método mais utilizado para avaliar tal desempenho. CBDM é a previsão de qualquer quantidade luminosa, usando condições realistas de sol e céu, derivadas de dados climáticos padronizados (MARDALJEVIC, 2000, REINHART e HERKEL, 2000). As avaliações que utilizam a CBDM são realizadas, geralmente, para um ano inteiro, em um intervalo de uma hora ou menos, a fim de capturar a dinâmica diária e sazonal da luz natural (MARDALJEVIC E CHRISTOFFERSEN, 2017). Tais avaliações são feitas apenas por simulação computacional, necessitam de programas com capacidades específicas, alto grau de detalhamento e limitam-se a profissionais especializados.

Com o objetivo de contornar tais especificidades e viabilizar a avaliação do desempenho luminoso das edificações, a norma europeia prEN 17037:2018 (CEN, 2018) oferece, como alternativa a esse tipo de simulação (Método 2 da norma), um método de cálculo da provisão de luz natural para ambientes internos baseado no fator de luz diurna (FLD) temporal (Método 1 da norma). O método utiliza informações climáticas de iluminância externa difusa para determinar os valores de FLD que serão necessários para atingir uma iluminância alvo por um determinado período do ano (MARDALJEVIC, 2000). Entendeu-se que, apesar de suas limitações, o FLD é um parâmetro amplamente difundido, de fácil obtenção, com uma ampla gama de ferramentas computacionais gratuitas e de fácil operação, por exemplo, Dynamic Daylighting (MARSH, 2016) e Daylight Visualizer (VELUX, 2009). A inclusão da dimensão temporal ao FLD amplia o seu escopo, trazendo informações sobre a disponibilidade de luz do local de implantação da edificação. O método foi apresentado como uma forma mais acessível de estimar o desempenho das edificações, passível de ser utilizado por um maior número de profissionais, viabilizando a difusão da norma.

Fundamentando-se nesse conceito, Fonseca et al (2019), propuseram uma aplicação alternativa para o FLD temporal, visando a estimativa da redução do consumo devido ao aproveitamento da luz natural. A proposta foi testada frente a uma única volumetria, considerando três diferentes cidades e dois tipos de sensores de iluminação, dimerizável e de passos, bem como a influência da discretização do zoneamento das áreas controladas pelos sensores. Os resultados obtidos pela aplicação do método subestimaram o aproveitamento da luz natural. A precisão obtida para estimativas da zona primária de iluminação natural resultou em erros menores do que 7% para todas as cidades e orientações, sendo considerada adequada para um método simplificado. Nesse sentido, o presente trabalho visa aprofundar a proposta investigando o potencial de aplicação do fator de luz diurna temporal para a estimativa do consumo de iluminação de ambientes com diferentes volumetrias, tipos de aberturas e distribuição de sensores de iluminação.

2. OBJETIVO

Verificar o potencial da utilização do fator de luz diurna temporal para a estimativa do consumo de iluminação de ambientes com diferentes volumetrias, tipos de aberturas e distribuição de fotosensores.

3. MÉTODO

Visando atingir o objetivo proposto, o potencial do método simplificado baseado no FLD temporal foi verificado por meio de um estudo de caso, comparando-se os seus resultados com os obtidos pela simulação computacional anual CBDM. O método deste trabalho foi dividido em três etapas: a apresentação do estudo de caso; a conceituação do método simplificado; e a avaliação do seu potencial.

3.1 Estudo de caso

O estudo de caso consistiu em um ambiente de geometria regular, situado na cidade de Florianópolis. Trata-se de um ambiente com pé direito de 3 m e uma única abertura centralizada horizontalmente, situada a 1,1 m do piso, com verga a 2,10 m. Para a definição da iluminância de projeto, atribuiu-se ao espaço a atividade de sala de aula, cuja iluminância corresponde a 300 lux (ABNT, 2013). Estabeleceu-se um período de ocupação de 10 horas, das 8h às 18h, ao longo de todo o ano. A densidade de potência instalada (DPI) adotada foi de 15,5 W/m², correspondente à classe D para escolas do método do edifício completo da INI-C (INMETRO, 2018). O aproveitamento da luz natural foi computado por meio de fotosensores de dimerização ideal. A potência controlada pelos sensores variou entre os cenários.

Para a criação dos cenários paramétricos, foram variados o tamanho da abertura, a profundidade do ambiente e a área de atuação dos fotosensores. Todos os cenários foram avaliados nas quatro orientações cardeais, totalizando 24 análises. A modelagem tridimensional foi feita no software Rhinoceros.

A variação da área de abertura visou avaliar o impacto do aumento do tamanho da fonte de luz. A altura da verga e a do peitoril foram fixadas, aumentando-se a sua dimensão para as laterais, estendendo-se ao limite máximo das extremidades laterais da fachada. A abertura do caso base correspondeu a 1/3 da largura da fachada, possibilitando a verificação de quanto a zona de iluminação natural se expande para as laterais da abertura.

A variação da profundidade objetivou testar geometrias diferentes, possibilitando a comparação entre um ambiente de proporção 1:1 e 1:2 (largura: profundidade). A variação da área de atuação do fotosensor visou avaliar o impacto do critério da sua definição no consumo energético de iluminação.

O cenário 1 consiste no caso base (Tabela 1). O cenário 2 aborda a variação do tamanho da abertura; o cenário 3, a variação da profundidade e da distribuição de sensores em relação ao caso 1; o cenário 4 é similar ao 3, incluindo a variação do tamanho da abertura; o cenário 5, varia apenas a distribuição de sensores em relação ao caso 1; e o cenário 6 é similar ao 5, adicionando a variação do tamanho da abertura. A seguir, é apresentada uma síntese dos 6 cenários em função da área de atuação dos fotosensores:

Cenário 1 e Cenário 2: Os modelos de planta isométrica, com as duas variações de abertura foram avaliados com toda a potência instalada controlada. Logo, para esses casos, a área total do ambiente corresponde à zona controlada pelos fotosensores (Z_{ILN}).

pós- | 5

Tabela 1. Característica dos Cenários

CENÁRIO 1		
<p>Dimensões (m): 6,0 x 6,0 Área (m²): 36,0 Abertura (m²): 2,0 x 1,0 PAF* (%): 11,1 PAP* (%): 5,5</p>		
CENÁRIO 2		
<p>Dimensões (m): 6,0 x 6,0 Área (m²): 36,0 Abertura (m²): 5,8 x 1,0 PAF* (%): 32,2 PAP* (%): 16,1</p>		
CENÁRIO 3		
<p>Dimensões (m): 6,0 x 12,0 Área (m²): 72,0 Abertura (m²): 2,0 x 1,0 PAF* (%): 11,1 PAP* (%): 2,8</p>		
CENÁRIO 4		
<p>Dimensões (m): 6,0 x 12,0 Área (m²): 72,0 Abertura (m²): 5,8 x 1,0 PAF* (%): 32,2 PAP* (%): 8,1</p>		
CENÁRIO 5		
<p>Dimensões (m): 6,0 x 6,0 Área (m²): 36,0 Abertura (m²): 2,0 x 1,0 PAF* (%): 11,1 PAP* (%): 5,5</p>		
CENÁRIO 6		
<p>Dimensões (m): 6,0 x 6,0 Área (m²): 36,0 Abertura (m²): 5,8 x 1,0 PAF* (%): 32,2 PAP* (%): 16,1</p>		

*PAF- Percentual de área de abertura por área de fachada

*PAP- Percentual de área de abertura por área de piso

Cenário 3 e Cenário 4: Os modelos de planta retangular, com as duas variações de abertura, foram avaliados com um terço ($1/3$) da potência instalada controlada. Isto é, um terço da área do ambiente próxima à abertura corresponde à zona controlada pelos fotosensores (Z_{ILN}), enquanto os dois terços ($2/3$) restantes não possuem controles (Z_{IA}). Nesses casos, a zona de iluminação natural corresponde à aproximadamente 2x a altura da verga, valor difundido como regra prática (REINHART e LOVERSO, 2010, CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2016).

Cenário 5 e Cenário 6: Os modelos de planta isométrica, com as duas variações de abertura, foram avaliados com metade ($1/2$) da potência instalada controlada. Isto é, metade da área do ambiente próxima à abertura corresponde à zona controlada pelos fotosensores (Z_{ILN}), enquanto a metade ($1/2$) restante não possui controle. Nesses casos, a zona de iluminação natural corresponde à aproximadamente 1,5x a altura da verga, valor também difundido como regra prática (CIBSE, 1999, REINHART e LOVERSO, 2010).

3.2. Conceituação do método simplificado

O método proposto será apresentado comparativamente ao conceito adotado pela diretiva europeia prEN 17037:2018 – Iluminação natural em edifícios (CEN, 2018). Para essa norma, um ambiente provê iluminação natural adequada se uma iluminância alvo e uma iluminância mínima forem alcançadas numa fração do plano de análise, em pelo menos uma fração das horas diurnas. Dessa forma, são avaliadas a dimensão espacial e a temporal da iluminação natural. São oferecidos dois métodos para a verificação da provisão de luz e ambos aplicam a ocorrência anual de um valor absoluto para iluminância interna, calculado a partir da disponibilidade de iluminância horizontal externa, determinado a partir de dados climáticos do local de avaliação. O Método 1 será apresentado a seguir e o Método 2 trata da simulação computacional de iluminâncias CBDM.

O Método 1, utilizado neste trabalho, estima o percentual da área do ambiente em que um FLD alvo ($FLD_{50\%}$), associado a uma iluminância alvo (E_{alvo}), aqui 300 lux, é superado em pelo menos 50% do período de análise. A dimensão temporal é acessada pela iluminância horizontal externa difusa mediana

pós- | 7

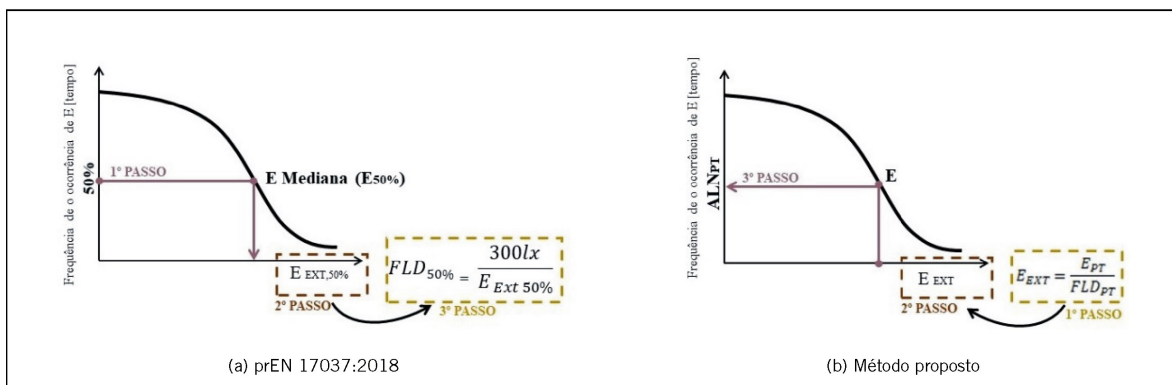


Figura 1 – Comparação entre a norma europeia e o método proposto

($E_{EXT,50\%}$). A $E_{ext,50\%}$ é definida por aquela iluminância que ocorre em uma localidade em pelo menos 50% das horas em que há disponibilidade de luz natural ao longo do ano (Figura 1a). Para a determinação do valor de $FLD_{50\%}$, que deve ser atingido para o atendimento à norma, divide-se a E_{alvo} pela $E_{EXT,50\%}$ do local. A verificação do atendimento do $FLD_{50\%}$ é feita em uma malha de pontos do plano de análise. O cálculo pode ser feito por métodos gráficos, analíticos ou computacionais, desde que considere todas as componentes do fluxo luminoso.

A proposta deste trabalho assume a premissa que a dimensão temporal conexa à provisão de luz natural poderia ser associada à operação dos fotosensores. Admitiu-se que o sistema de iluminação artificial precisaria ser acionado apenas nas horas em que a E_{alvo} não pudesse ser garantida pela E_{EXT} de acordo com o FLD de um ponto do ambiente (FLD_{PT}).

Considerando que a redução do uso da potência instalada, devido ao aproveitamento da luz natural, pode ser feita por meio do controle da intensidade da potência ou pelo seu tempo de acionamento, adaptou-se a utilização da E_{EXT} . Ao invés de se adotar a $E_{EXT,50\%}$ como um valor de referência para o cálculo do $FLD_{50\%}$ em função da E_{alvo} , ela foi utilizada para a estimativa do tempo em que o FLD_{PT} , associado a uma iluminância de projeto (E_{PT}), é superado (Figura 1b). A dimensão temporal é acessada pela curva de frequência de ocorrência da iluminância horizontal externa difusa. A E_{PT} é obtida no projeto luminotécnico, consistindo na iluminância adotada para o acionamento dos fotosensores previstos.

Diferentemente da norma europeia, que avalia a dimensão espacial da iluminação, essa proposta aborda o FLD para um ponto. Esse ponto deve localizar-se na região que recebe menos luz direta proveniente das aberturas da área de atuação do fotosensor. A área de atuação dos sensores é obtida no projeto luminotécnico, previamente escolhida pelo projetista. Para a caracterização desse ponto, adota-se o ponto mais afastado da abertura que proporciona a iluminação natural ao sensor, seja ela lateral ou zenital. O método simplificado é restrito a ambientes de geometria regular com uma única abertura.

A frequência de ocorrência da iluminância externa que garante o FLD calculado para o ponto de referência, dada em percentual, foi denominada autonomia da luz natural do ponto (ALN_{PT}). O complemento do seu valor corresponde ao percentual da potência controlada realmente utilizada. A potência instalada controlada pelos fotosensores foi denominada potência de iluminação em uso (PIU) e a sua respectiva densidade de potência, de densidade de potência em uso (DPIU). Enquanto a densidade de potência instalada (DPI) é associada a 100% da potência acionada em todo o período de ocupação, a DPIU corresponde ao tempo ou a intensidade da potência acionada durante o período de ocupação, em função do aproveitamento da iluminação natural. A seguir, é apresentada a sequência para a aplicação do método proposto. O Método consiste em 6 passos e será aplicado para cada um dos cenários do estudo de caso.

1º passo: Identificar o ponto de verificação de disponibilidade de luz (PT) nas zonas controladas por fotosensores (Z_{ILN})

O ponto deve situar-se em um plano horizontal de referência, elevado a 0,75 m do piso acabado. Para iluminação lateral, deve ser identificado o ponto mais afastado da abertura, medido perpendicularmente à janela que proporciona a iluminação natural a esse conjunto de fotosensores. Para zenitais, deve ser considerado o ponto do perímetro da zona mais distante dos limites da abertura zenital, vista em projeção.

pós- | 6

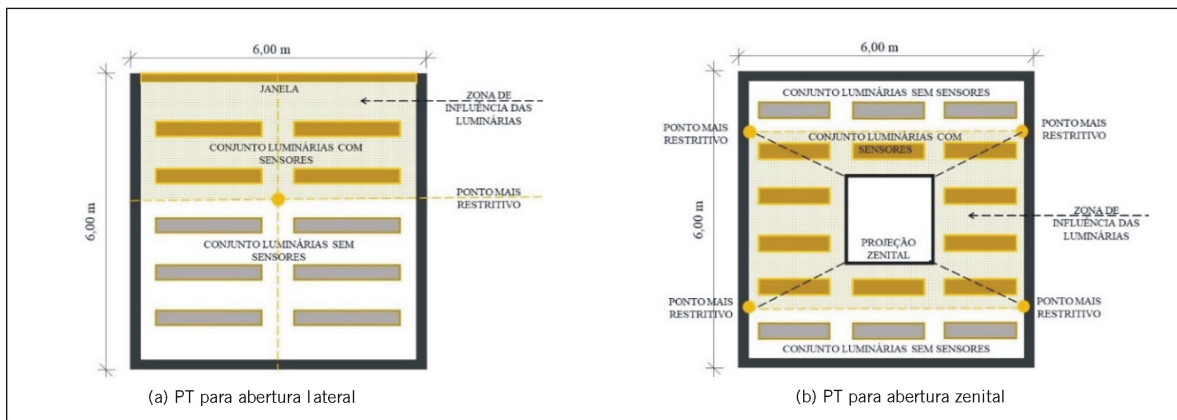


Figura 2 – Exemplo de locação do PT para abertura lateral e zenital

2º passo: Calcular o fator de luz diurna para o ponto identificado (FLD_{PT})

Para esse trabalho, o cálculo do FLD_{PT} nos pontos de verificação de cada um dos cenários foi realizado pelo plug-in DIVA-for-Rhino. O FLD_{PT} poderia ter sido obtido por ferramentas mais simples, em especial por tratar-se apenas de um ponto de análise. Entretanto, considerando que o contexto do trabalho envolve a simulação computacional na etapa de verificação, optou-se pela utilização do mesmo programa, uma vez que a modelagem no programa dos cenários já seria feita para as etapas seguintes do trabalho.

3º passo: Calcular a iluminância horizontal difusa externa (E_{EXT}), necessária para garantir a iluminância requerida no interior do ambiente, de acordo com o FLD_{PT} calculado

A partir do valor de FLD_{PT} obtido, calcula-se a iluminância horizontal difusa externa (E_{EXT}) necessária para garantir a iluminância no ponto (E_{PT}), conforme Equação 1. A iluminância requerida no ponto (E_{PT}) deve ser obtida no projeto luminotécnico, no caso desse estudo foi de 300 lux.

$$E_{EXT} = \frac{E_{PT}}{FLD_{PT}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

E_{EXT} – Iluminância horizontal difusa externa (lx)

E_{PT} – Iluminância no ponto (lx)

FLD_{PT} – Fator de luz diurna no ponto (%)

4º passo: Verificar a autonomia da luz natural para o ponto (ALN_{PT})

A ALN_{PT} corresponde ao percentual de horas de ocupação do ambiente atendidas apenas pela luz do dia ao longo do ano. Ela é obtida por meio da curva de frequência de ocorrência da E_{EXT} da localidade. Tal curva é feita utilizando-se os dados da E_{EXT} do arquivo climático da cidade, com base nas horas de ocupação em questão. No eixo das abscissas são plotados os intervalos de iluminância horizontal difusa e, no eixo das ordenadas, o percentual de ocorrência. Para esse estudo, adotou-se a curva de Florianópolis, obtida pelo arquivo climático EPW-INMET (LABEEE, 2018), considerando o período de ocupação de 10h (8h -18h).

5º passo: Cálculo da Densidade de Potência Instalada em Uso do Ambiente ($DPIU$)

O cálculo da densidade de potência instalada em uso do ambiente ($DPIU_A$) é realizado por meio da ponderação das densidades de potência instalada das zonas de iluminação pela sua respectiva área de influência, conforme Equação 2. Para esse estudo, adotou-se a DPI do estudo de caso, 15,5 W/m². A $DPIU_A$ foi calculada para cada cenário.

$$DPIU_A = \frac{[(A_{ZI} * DPI) + \sum_{i=0}^n (A_{ZILN} * (1 - ALN_{PT}))]}{A_A} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$DPIU_A$ – Densidade de potência instalada em uso do ambiente (W/m²)

A_{ZI} – Área da zona desprovida de sensores de iluminação natural (m²)

DPI – Densidade de potência instalada original (W/m²)

A_{ZILN} – Área da zona com sensores de iluminação natural (m²)

ALN_{PT} – Autonomia da luz natural para o ponto

A_A – Área de toda a zona térmica ou porção da edificação em avaliação (m²)

6° passo: Cálculo de Consumo de Iluminação

O consumo de iluminação, incluindo a economia gerada pelos fotosensores, consiste no produto área do ambiente pela $DPIU_A$ calculada no item anterior pela quantidade de horas do período de ocupação, conforme Equação 3. O período de ocupação adotado foi o do estudo de caso, 10h nos 365 dias do ano, e a área variou conforme o cenário avaliado.

$$Consumo_{total} = \frac{(A_A * DPIU_A * h)}{1000} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Consumo total – Consumo anual (kWh)

$DPIU_A$ – Densidade de potência instalada em uso do ambiente (W/m^2)

h – Quantidade de horas de ocupação em um ano

A_A – Área de toda a zona de iluminação ou porção da edificação em avaliação.

3.3. Avaliação do potencial do método

A avaliação do potencial do método simplificado foi feita em comparação à simulação completa anual baseada no clima. Foi simulada a autonomia da luz natural e o consumo anual de iluminação para os seis cenários, para as quatro orientações cardeais. O potencial do método foi avaliado em dois momentos: para a estimativa da autonomia da luz natural do ponto, 4° passo da sequência de aplicação do método; e para a estimativa do consumo de iluminação do ambiente, 6° passo. Como o método simplificado não é sensível à variação da orientação da edificação, a influência dessa variável só foi contemplada na simulação computacional.

As simulações foram realizadas no plug-in DIVA-for-Rhino (SOLEMMMA LLC, 2014) do programa Rhinoceros (MCNEEL; ASSOCIATES, 2014). Foram adotados os mesmos arquivos climáticos utilizados para gerar a curva de frequência de ocorrência de iluminância horizontal externa difusa da cidade de Florianópolis. Os Parâmetros do Radiance adotados para a simulação computacional foram: inter-reflexões difusas do ambiente, 7; divisão do ambiente, 1000; amostragem do ambiente, 256; precisão do ambiente, 0,1; resolução do ambiente, 300; limiar direto, 0; e amostragem direta, 0. O plano de análise foi localizado a 0,75 m em relação ao piso, com uma malha de pontos distribuída ao longo de toda a área, com espaçamento de 0,5 m.

Para a análise dos resultados da autonomia da luz natural simulada, buscou-se na malha o valor obtido no ponto correspondente ao adotado para a verificação do método simplificado (ALN_{pt}). A comparação entre os resultados de ambos os métodos foi feita por meio da análise de erros, considerando-se o erro percentual do período e o erro do período.

Os valores de consumo obtidos pela simulação foram comparados aos obtidos pelo método simplificado, gerados a partir da equação 3, apresentada no item 3.2. Destaca-se que o programa DIVA-for-Rhino admite, como referência para o cômputo da dimerização ideal, o ponto de menor iluminância de uma zona luminosa. No caso deste trabalho, o ponto com menor iluminância do conjunto de pontos controlados pelo sensor. A verificação da precisão do método simplificado foi feita por análise gráfica de correlação simples, individualizada por orientação dos modelos dos estudos de caso.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Aplicação do método simplificado ao estudo de caso

Os resultados da aplicação do método simplificado aos 6 cenários serão apresentados em paralelo com cada um dos 6 passos da sequência estabelecida no item 3.2.

1º passo: Identificar o ponto de verificação de disponibilidade de luz (PT) nas zonas controladas por fotosensores (Z_{ILN})

Identificou-se o ponto mais restritivo para a iluminação natural de cada zona controlada por sensores dos 6 estudos de caso, conforme os critérios estabelecidos no item 3 (1º passo). Os pontos foram identificados na Tabela 1 do item 3.1.

2º passo: Calcular o fator de luz diurna para o ponto identificado (FLD_{PT})

A Tabela 2 apresenta os valores encontrados em cada ponto de verificação nos 6 cenários apresentados.

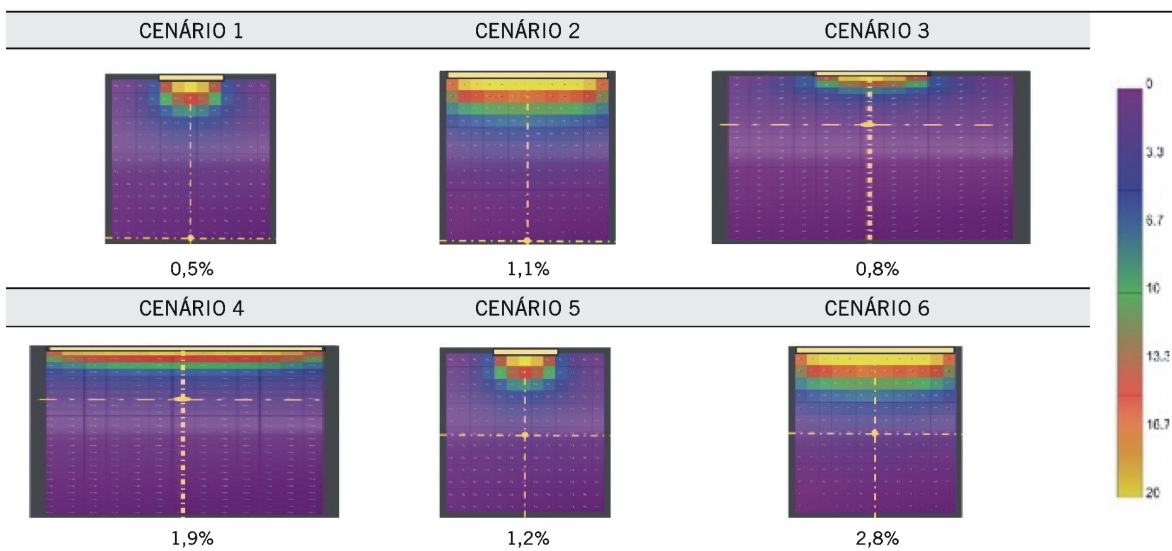


Tabela 2. Fatores de luz diurna nos pontos de verificação

3º passo: Calcular a iluminância horizontal difusa externa (E_{EXT}) necessária para garantir a iluminância requerida no interior do ambiente, de acordo com o FLD_{PT} calculado

Calculou-se a E_{EXT} pela Equação 1. A iluminância alvo adotada foi de 300 lux e os FLD_{PT} para cada caso foram apresentados na Tabela 2. Os resultados serão apresentados na Tabela 3.

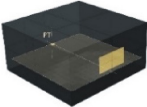
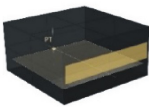
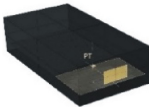
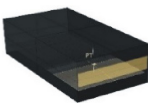
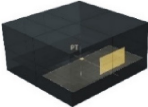
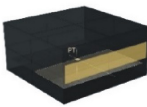
CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 4	CENÁRIO 5	CENÁRIO 6
					
60.000 lx	27.272 lx	37.500 lx	15.989 lx	25.000 lx	10.714 lx

Tabela 3. Valores de iluminância horizontal difusa externa necessárias em cada PT

4º passo: Verificar a autonomia da luz natural para o ponto (ALN_{PT})

A Figura 3 apresenta a curva de frequência de ocorrência de iluminância horizontal difusa externa para Florianópolis. Os processos para obtenção do gráfico foram descritos no item 3.2. Os valores de iluminância horizontal difusa externa (E_{EXT}) encontrados no passo anterior (Tabela 3) foram localizados no eixo das abscissas da figura 3, para a determinação da autonomia da luz natural para o ponto (ALN_{PT}) no eixo das ordenadas.

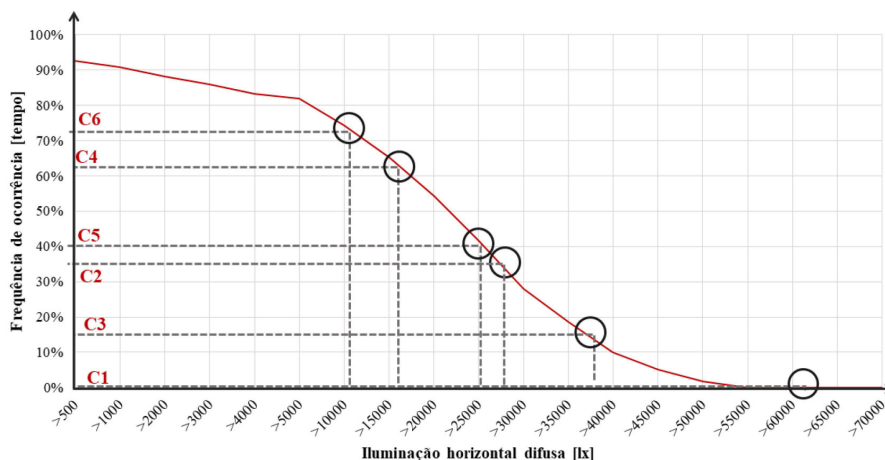


Figura 3. Autonomia da luz natural – Florianópolis – período de ocupação 8h – 18h

Os valores de ALN_{PT} encontrados no gráfico, para cada um dos 6 cenários, foram destacados na Tabela 4.

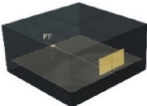
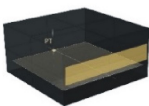
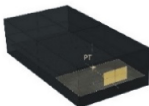
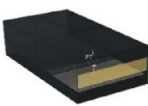
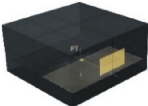
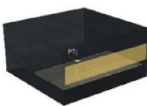
CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 4	CENÁRIO 5	CENÁRIO 6
					
0%	35%	15%	61%	40%	71%

Tabela 4. Autonomia de luz natural, ALN_{PT} , no ponto de verificação dos modelos

5° passo: Cálculo da Densidade de Potência Instalada em Uso do Ambiente ($DPIU_A$)

Para o cálculo da $DPIU_A$, utilizou-se a Equação 2. Os valores adotados para as variáveis de entrada da equação, bem como os resultados obtidos, foram apresentados na tabela 4.

6° passo: Cálculo de Consumo de Iluminação

O cálculo do consumo foi feito com base na equação 3. A Tabela 4 traz todos os valores adotados para as variáveis independentes da equação para todos os cenários. Os resultados obtidos foram apresentados acompanhados do consumo caso não houvesse sensores de iluminação natural.

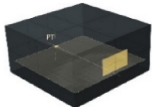
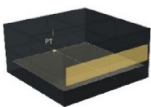
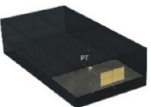
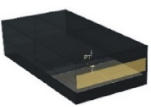
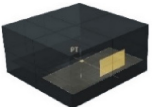
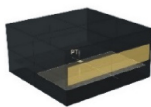
	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 4	CENÁRIO 5	CENÁRIO 6
						
A_{zi}^*	36 m ²	36 m ²	24 m ²	24 m ²	18 m ²	18 m ²
DPI*	15,5 W/m ²					
A_{zILN}^*	0 m ²	0 m ²	48 m ²	48 m ²	18 m ²	18 m ²
ALN _{PT} *	0%	35%	15%	61%	40%	71%
A_A^*	36 m ²	36 m ²	72 m ²	72 m ²	36 m ²	36 m ²
$DPIU_A$	15,50 W/m ²	10,10 W/m ²	14,73 W/m ²	12,35 W/m ²	12,40 W/m ²	9,99 W/m ²
Consumo com sensores de Iluminação	2036,70 KWh/ano	1323,86 KWh/ano	3869,73 KWh/ano	3245,14 KWh/ano	1629,39 KWh/ano	1313,67 KWh/ano
Consumo Total	2036,70 KWh/ano	2036,70 KWh/ano	4073,40 KWh/ano	4073,40 KWh/ano	2036,70 KWh/ano	2036,70 KWh/ano

Tabela 5. Valores de $DPIU_A$ e consumo obtidos para os modelos analisados

$DPIU_A$ – Densidade de potência instalada em uso do ambiente (W/m²)

A_{zi} – Área da zona desprovida de sensores de iluminação natural (m²)

DPI – Densidade de potência instalada original (W/m²)

A_{zILN} – Área da zona com sensores de iluminação natural (m²)

ALN_{PT} – Autonomia da luz natural para o ponto

A_A – Área de toda a zona térmica ou porção da edificação em avaliação (m²)

4.2. Avaliação da precisão do método em relação à simulação computacional

4.2.1 Autonomia de Luz Natural

Nos gráficos da Figura 4 (a e b) são apresentados os erros do período atribuídos à comparação da autonomia de luz natural obtida pelo método simplificado e por simulação. Na Figura 4, c e d, são apresentados os erros

percentuais para a mesma comparação. Vale ressaltar que, nos casos em que o valor da ALN obtido por simulação foi zero, não foi possível calcular o erro percentual, já que o mesmo utiliza o resultado das simulações como divisor. Os resultados foram separados em função do tamanho da abertura dos casos analisados. Essa diferenciação foi feita para avaliar o método frente à variação do tamanho abertura para casos semelhantes.

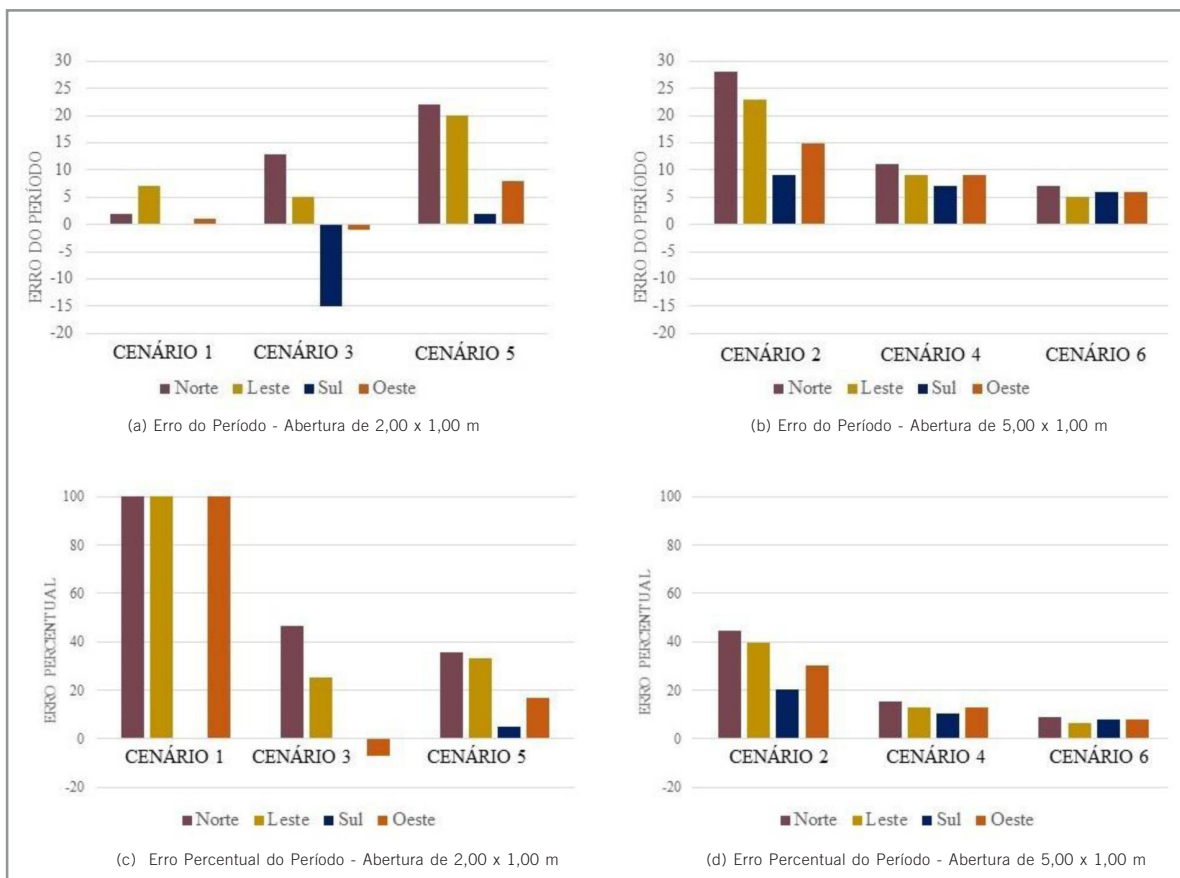


Figura 4 – Análise de erros da Autonomia de Luz Natural

Os resultados apresentados na Figura 4 (a e b) mostram que o método apresentou valores de ALN_{PT} menores do que os obtidos por simulação, à exceção das orientações sul e oeste do cenário 3. A subestimação da estimativa da ALN_{PT} pelo método simplificado era esperada, visto que o método considera apenas a componente difusa da luz, enquanto a simulação a considera de forma global. Por não considerar as diferentes orientações solares, o método tende a generalizar os resultados, o que pode afetar sua precisão em relação a orientações que tenham valores de autonomia de luz natural muito altos ou muito baixos, como ocorrido no caso 3.

Observando-se a Figura 4 (c e d), pode-se notar, em geral, um decréscimo no erro percentual do cenário 1 para o cenário 3 e para o cenário 5 (Figura 4c), e

do cenário 2 para o cenário 4 e para o cenário 6 (Figura 4d). Destaca-se que a distância do ponto de análise em relação à janela é de 6 m para os cenários 1 e 2; de 4 m para os cenários 3 e 4; e de 3 m para os cenários 5 e 6. Esses resultados indicam que a precisão do método é inversamente proporcional à distância que o ponto de análise está da abertura, uma vez que, quanto mais distante o ponto esteve da abertura, menor foi a precisão do método, independentemente da geometria do ambiente. Podem ocorrer pequenas variações em função da orientação, como ocorreu para os cenários 3 e 5 para as fachadas leste e oeste. Tais cenários apresentam fachadas idênticas, cuja diferença reside na profundidade dos ambientes, 12 m para o cenário 3 e 6 m para o cenário 5, e na distância do ponto de análise da janela, 4 m para o cenário 3 e 3 m para o cenário 5. Essa variação não se repete quando a abertura é maior, como se percebe nos resultados dos cenários 4 e 6, para as mesmas fachadas.

Observou-se também que, em geral, para os cenários semelhantes, quando a abertura é maior, os erros são menores. Vide os erros percentuais, analisados por fachada, do cenário 1 em comparação ao 2, do cenário 3 em comparação com o 4 e do cenário 5 em comparação com o 6. A orientação oeste do cenário 4 e a orientação sul do cenário 6 foram exceções dessa tendência observada, apresentando erros percentuais maiores do que os seus pares. Diante das constatações apresentadas, deduz-se que o método é menos preciso para pontos com pouca luminosidade, independentemente da razão pela qual ela ocorre.

4.2.2 Consumo de Iluminação

A Figura 5 traz os gráficos de correlação entre os resultados de consumo de iluminação obtidos pelo método simplificado e pela simulação anual. Os pontos dos gráficos correspondem a todos os cenários estudados. A orientação que apresentou correlação mais forte entre os resultados foi a oeste, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9665 e a mais fraca, a leste, com 0,884. Esses resultados indicam que o método tem potencial de ser aplicado para as diversas orientações com desempenho semelhante. Entretanto, tal potencial deve ser confirmado por uma amostra estatística representativa para a validação do método.

As orientações oeste e sul, que obtiveram correlação mais forte, consistem nas orientações para as quais o método simplificado superestimou os valores de ALN_{PT} , ou apresentou erros menores comparados às demais orientações, conforme ilustrado nos gráficos de erro do período da Figura 5a e 5b. Já as orientações norte e leste, de menor coeficiente de determinação, foram as que apresentaram os menores valores de consumo, devido à maior autonomia de luz natural no ponto de referência dos sensores.

O método se mostrou menos preciso para essas orientações, justamente por tratar-se das orientações em que a radiação direta é mais influente para Florianópolis. Novamente justifica-se, já que o método considera apenas a parcela difusa da luz, enquanto as simulações a consideram em sua totalidade. Os valores de consumo dos ambientes obtidos pela ponderação dos sistemas de iluminação, por meio do 6º passo do método simplificado e pelas simulações, constam na Figura 6.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho verificou a aplicabilidade de um método simplificado, baseado na iluminação difusa, para a estimativa do consumo de iluminação, por meio de um estudo de caso. Foi testada a validade da escolha de um único ponto, localizado na parcela de menor disponibilidade de luz natural da área de influência de um grupo de sensores, para verificar o potencial do método quanto à estimativa de autonomia de luz natural, bem como do consumo de iluminação. O método foi avaliado frente aos resultados obtidos pela simulação referente a duas volumetrias, dois tipos de abertura e três tipos de distribuição de sensores de iluminação.

Os resultados mostram que o método simplificado, em geral, subestima o aproveitamento da luz natural. Mostram também que a forma de distribuição dos sensores afeta o seu desempenho. O método apresentou resultados mais precisos para os casos com maiores aberturas e com sensores localizados próximos às mesmas.

Quanto à pertinência da escolha do ponto mais restritivo, julgou-se que a precisão obtida para sensores próximos às aberturas (~1,5 X a altura da verga) combinados com as aberturas maiores foi aceitável para um método simplificado, com erros de ~10%. Recomenda-se que sejam realizados mais testes para determinar um limite de aplicação do método, de acordo com a distância do ponto de referência em relação à fachada, com a dimensão da abertura e considerando mais localidades com climas e latitudes diversos.

Quanto ao potencial do método para estimar o consumo de iluminação, concluiu-se que a divergência entre os seus resultados e os das simulações foram aceitáveis, com R^2 próximo a 0,9 para as 4 orientações e sem nenhuma superestimação por parte do método em relação à simulação. Por se tratar de uma simplificação, o mesmo apresenta limitações referente a orientações e a componente direta da luz. Recomenda-se mais estudos, com uma amostra estatística representativa para a validação do método.

A escolha dos estudos de caso se mostrou adequada, pois permitiu verificar algumas limitações do método correlatas à fonte de luz, à geometria e à setorização dos sensores. Para a disseminação do método, podem ser geradas curvas para diversas cidades, basta utilizar os dados do arquivo climático e fazer um histograma, ou zonas climáticas cujas características sejam semelhantes, e disponibilizá-las ao público em plataforma digital.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE. Standard 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings I. *Ansi/Ashrae/les- American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*. 90.1. Atlanta. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15575-1: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT NBR ISO/CIE 8995-1: 2013 Iluminação de ambientes de trabalho- Parte 1: Interior. *Associação Brasileira De Normas Técnicas*. Rio de Janeiro. N. 46.2013.
- MARSH, A. *Dynamic Daylighting*. v. 2.0.2016.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. TITLE 24 - 2016 Building Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings CEC-400-2012-004-CMF-REV2. California Energy Commission. Part 1. 2016.

CIBSE. *Lighting Guide 10: Daylighting and Window Design*. Chartered Institution of Building Services Engineers. Londres. 1999. 88 p.

EDWARDS, L.; TORCELLINI, P. *A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants*. National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado: 2002. 2002, 54 p. (NREL/TP-550-30769)

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. *CEN TC 169 WG 11 – Daylight: Daylight in buildings*. European Standards. CEN/TC 169. Date: 2017-07. TC 169 WI 00169068. Secretariat: DIN. 2017

FONSECA, R.W; PEREIRA, F.O.R; FRANÇA, S.S. Aplicação de Método para Estimar a Autonomia da Luz Natural, Baseado na Luz Difusa, para a Obtenção do Potencial Energético da Iluminação Natural. In: XV Encontro Nacional e XI Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 2019. João Pessoa - PB.

INMETRO. CONSULTA PÚBLICA. Aperfeiçoamento do Regulamento Técnico da Qualidade para a Classe de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. *Ministério do Desenvolvimento*. Portaria n.º 248. INMETRO, 2018.

INMETRO. Requisito técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. *J. E. C. E. Ministério Do Desenvolvimento*. 2Rule. Portaria n. 372. INMETRO. N. 87.2010.

KENNEY, M.; BIRD, H. and ROSALES, H. *2019 California Energy Efficiency Action Plan*. California Energy Commission. Publication Number: CEC400-2019-010-SF, 37p.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. *Arquivos climáticos*. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018> Acesso em: dezembro de 2018.

MARDALJEVIC, J. Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. *Lighting Research and Technology*, v. 32(3), p.111-118, 2000.
DOI: <https://doi.org/10.1177%2F096032710003200302>

MARDALJEVIC, J. and CHRISTOFFERSEN, J., 'Climate connectivity' in the daylight factor basis of building standards. *Building and Environment*, v. 113, p. 200-209, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.009>

MAYHOUB, M. S.; CARTER, D. J. The costs and benefits of using daylight guidance to light office buildings. *Building and Environment*, v. 46, n. 3, p. 698-710. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.014>

MORAES, L. N. *Estudo comparativo de sistemas de iluminação artificial com diferentes luminárias considerando a disponibilidade de luz natural*. Florianópolis, 2012. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

PARISE, G.; MARTIRANO, L. and PARISE, L. *A Procedure to Estimate the Energy Requirements for Lighting*. In: IEEE Transactions on Industry Applications; 2016, Jan./Feb, 52 (1): 34-41. D.O.I. 10.1109/TIA.2015.2463761

REINHART, C. F.; HERKEL, S. The simulation of annual daylight illuminance distributions - a state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods. *Energy and Buildings*, v. 32(2), p.167-187, 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00042-6)

REINHART, C. F.; LOVERSO, V. R. M. A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight. *Lighting Research & Technology*, v. 42, n. 1, p. 7-31. 2010.
DOI: 10.1177/1477153509104765

ROCHA, A. P. de A. *Análise da Influência do Zoneamento da Iluminação Natural no Uso da Iluminação Artificial em Edifícios de Escritórios*. Florianópolis, 2012. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SOLEMMA LLC. DIVA for Rhino: Environmental Analysis for Buildings. v. 2.0. DIVA-for-Rhino é um plug-in de modelagem de iluminação natural e energia altamente otimizado para o modelador Rhinoceros - NURBS.2014.

VELUX. Daylight Visualizer. v. 2.0.2009.

Nota do Editor

Data de submissão: 30/03/2020

Aprovação: 30/10/2020

Revisão: RMO

Suelem Schier de França

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental

Cx Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6673-884X>

suelem0802@gmail.com

Raphaela Walger da Fonseca

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental

Cx Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7926-2414>

raphaela.walger@ufsc.br

Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental

Cx Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900

Orcid: <https://orcid.org/0000-00001-8679-1816>

ruttkay.pereira@ufsc.br