XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

APLICAÇÃO DE MÉTODO PARA ESTIMAR A AUTONOMIA DA LUZ NATURAL, BASEADO NA LUZ DIFUSA, PARA A OBTENÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Raphaela W. da Fonseca (1); Suelem de França (2), Fernando O. R. Pereira (3)
(1) Dr., Pós-Doutoranda do Departamento de Arquitetura e Urbanismo raphaela.walger@ ufsc.br
(2) Acadêmica do curso de Arquitetura e Urbanismo, suelem0802@gmail.com
(3) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, ruttkay.pereira@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Cx Postal 476, Florianópolis–SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-4974

RESUMO
Esse trabalho buscou verificar o potencial de uma aplicação alternativa do método para avaliar a provisão de luz natural, baseado no Fator de Luz Diurna, da norma europeia prEN 17037:2018, para estimar a redução do consumo de iluminação devido ao aproveitamento da luz natural. Primeiramente, apresentou-se a proposta de aplicação do método. Para acessar o seu potencial de aplicação propôs-se um estudo de caso, que foi avaliado comparativamente pelo método proposto e por simulação computacional anual baseada no clima. O estudo de caso foi avaliado considerando-se dois cenários de distribuição dos sensores de iluminação, dois tipos de sensores, dimerizável e por passos, e três localidades. Foram testadas a pertinência da escolha de um único ponto, localizado na porção de menor disponibilidade de luz da área de influência de um sensor, para simular o seu padrão de uso e o potencial do método para estimar o consumo de iluminação propriamente dito. Os resultados mostraram que a escolha do ponto de menor disponibilidade de luz foi considerada válida, recomendando-se mais estudos para determinar um limite de aplicação do método. Mostraram também que o método subestima o aproveitamento da luz natural, com algumas exceções, dependendo da orientação e da cidade avaliada. A forma de distribuição dos sensores afetou o seu desempenho. Confirmou-se o seu potencial para simular a operação dos dois tipos de sensores testados, com maior precisão para os dimerizáveis. Como conclusão geral, pode-se afirmar o potencial do método para estimar a economia de energia pela luz natural.
Palavras-chave: iluminação natural, consumo de iluminação, método simplificado.

ABSTRACT
This work aimed at verifying the potential of an alternative method to evaluate the daylight provision, based on the Daylight Factor, of the European standard prEN 17037:2018, to estimate the lighting energy consumption, due the harvesting daylight. First, the proposal for application of the method was presented. To access the application potential a case study was proposed, which was evaluated comparatively by the proposed method and by annual simulation based on climate. The case study was evaluated considering two scenarios of lighting controls distribution, two types of sensors, dimming and steps, and three locations. The relevance of choosing a single point was tested, located in the lower daylight portion of the sensor influence area, to simulate the use standard and the method potential of estimate the lighting energy consumption. The results showed that the choice of the lowest daylight point was valid, and further studies were recommended to determine the method application limit. They also showed the underestimation of the daylight by this method, with some exceptions depending on the orientation and the city evaluated. The sensor distribution also affects their performance. The potential of two types of sensors was confirmed, with greater accuracy for dimmers. As general conclusion, it can be affirmed the method potential to estimate the daylight energy saving.
Keywords: daylight, daylight autonomy, consumption, calculation method.

1. INTRODUÇÃO

Ao analisar-se os estudos referentes a iluminação natural, percebe-se a preferência dos usuários por esta como fonte de luz em um ambiente (EDWARDS; TORCELLINI, 2002; MAYHOUB; CARTER, 2011). Dessa forma, o melhor aproveitamento da luz natural é de suma importância para criação de projetos de alto desempenho. Para se garantir um desempenho mínimo ou elevar a qualidade das edificações, códigos normas e certificações buscam estipular critérios para que as edificações possam ser avaliadas. No Brasil, os códigos de obras e a norma de desempenho de edificações residenciais, ABNT NBR 15.575 (ABNT, 2013) visam assegurar uma quantidade mínima de luz no ambiente interno. Quanto ao aspecto energético, o Regulamento Técnico da Qualidade para a Classe de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (INMETRO, 2010) contabiliza o potencial energético da luz natural como bonificação, que permite que a classe da edificação seja elevada em até um nível. Esse regulamento está em fase de aperfeiçoamento. Em sua nova versão, a edificação é avaliada com base na energia primária consumida, permitindo a contabilização do aproveitamento da luz natural de maneira mais realista (INMETRO, 2018).

A contabilização do aproveitamento energético da luz natural pode ser feita utilizando-se a simulação computacional anual com dados baseados no clima ou por métodos simplificados. A primeira, embora mais precisa, demanda elevado detalhamento e profissionais devidamente treinados para garantir a qualidade dos resultados. Os métodos simplificados, são menos precisos, mas propiciam respostas rápidas sem necessitar de significativo detalhamento de informações. Normas consagradas, como as americanas ASHRAE 90.1 (2016) e TITLE 24 (2016), oferecem como alternativa de avaliação, a avaliação prescritiva, que contempla fatores de ajuste de potência, viabilizando a redução de 10% da potência instalada, para conjuntos de luminárias com sensores de luz natural. Entretanto, esse tipo de avaliação não computa qualquer diferenciação atribuída às características particulares das edificações.

Com o intuito de se oferecer uma alternativa intermediária, cuja aplicação não seja tão complexa quanto à da simulação computacional, mas que contabilize o potencial da luz natural de maneira mais precisa que a prescritiva citada, esse trabalho visa apresentar a aplicação de um método já consagrado para a determinação da suficiência luz natural, para a determinação do potencial energético de conjuntos de luminárias controlados por sensores de luz natural. O método adotado, presente na norma europeia prEN 17037:2018 (Moraes; Pereira, 2011, CEN, 2018) baseia-se em uma aplicação do fator de luz diurna - FLD, associado à uma frequência de ocorrência de iluminâncias horizontais difusas externas. Essa abordagem, agrega ao difundido conceito do FLD, a variação de disponibilidade de luz ao longo do ano de cada localidade.

2. OBJETIVO

Verificar o potencial de se utilizar um método para avaliar a provisão de luz natural, baseado na disponibilidade de iluminação difusa, para estimar a redução do consumo de iluminação devido ao aproveitamento da luz natural.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em duas etapas:

1. apresentação da proposta de aplicação do método de avaliação da provisão de luz natural, baseado na disponibilidade de iluminação difusa, da prEN 17037:2018 (CEN, 2018) para prever o consumo de iluminação, quando há o aproveitamento da luz natural; e
2. avaliação do potencial do método.

3.1. Proposta de aplicação do método de avaliação da provisão de luz natural, baseado na disponibilidade de iluminação difusa, da prEN 17037:2018 para a estimativa do consumo de iluminação

A presente proposta, tem como base o método para a estimativa da provisão de luz natural para ambientes internos baseado no Fator de Luz Diurna - FLD da diretiva europeia prEN 17037:2018 – Iluminação natural em edifícios (CEN, 2018). Para essa norma, um ambiente iluminado é considerado prover iluminação natural adequada, se uma iluminância alvo e uma iluminância mínima forem alcançadas numa fração do plano de referência, 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, 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 primeiro método de cálculo, utilizado nesse trabalho, é baseado no FLD e em dados cumulativos de disponibilidade de luz do dia. Para a determinação dos valores de FLD é empregada a iluminância horizontal externa difusa mediana ($E_{ext\ dif\ mediana}$), que 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 (ver Figura 1a). O FLD é calculado para uma malha de pontos de um plano de análise para a estimativa da área em que o FLD alvo é superado.

A proposta de se utilizar o FLD somado à disponibilidade anual de iluminância horizontal externa difusa para a estimativa do consumo de iluminação, assume como premissa, que a dimensão temporal conexa à provisão de luz natural poderia ser associada à operação de sensores de luz natural. Dessa forma, admitiu-se que se um ponto do ambiente apresenta suficiência de luz natural em 50% das horas do ano, precisará de complementação do sistema de iluminação artificial apenas nas 50% restantes.

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. Assim, para essa proposta, adaptou-se a utilização da iluminância horizontal externa difusa. Ao invés de se adotar a sua mediana (iluminância que ocorre em 50% do tempo) como um valor alvo de referência para se obter o FLD alvo e o FLD mínimo a ser superado, ela foi transformada na variável dependente, para se estimar o tempo em que determinado FLD é superado. Esse FLD, toma como base a iluminância alvo do projeto luminotécnico, utilizada para o acionamento dos sensores previstos. A dimensão temporal é acessada pela frequência de ocorrência da iluminância horizontal externa difusa que garante o FLD calculado para um ponto de referência (Figura 1b).



(a) prEN 17037:2018 (b) Método proposto

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

Diferentemente da norma europeia, que avalia a dimensão espacial da iluminação, essa proposta aborda o FLD para um ponto. Esse ponto, corresponde ao ponto de menor luminosidade da área de atuação do sensor de luz natural de um conjunto de luminárias. Para a caracterização do ponto de menor luminosidade adotou-se o ponto mais afastado da(s) abertura(s) que proporciona a iluminação natural ao fotosensor, seja(m) ela(s) lateral(is) ou zenital(is).

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 por sensores de luz natural, 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, por meio da instalação de controles do sistema de iluminação artificial. A seguir é apresentada a sequência para a aplicação do método proposto, denominado método da iluminação difusa.

3.1.1. Identificar o ponto de verificação de disponibilidade de luz (PT) nas zonas controladas por sensores de iluminação natural (ZILN)

As zonas correspondem à área de influência das luminárias controladas pelo conjunto de fotosensores automatizados. O ponto deve situar-se em um plano horizontal de referência, elevado a 0,75m 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.

3.1.2. Calcular o fator de luz diurna para o ponto identificado (FLD_{PT})

O Fator de Luz Diurna pode ser obtido por métodos gráficos, analíticos ou computacionais, desde que considerem como base de cálculo as três componentes do fluxo luminoso, a componente celeste, a refletida externa e a refletida interna.

3.1.3. 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

O cálculo da iluminância horizontal difusa externa (E_{EXT}) se dá pela Equação 1. A iluminância requerida no ponto (E_{PT}) deve ser obtida no projeto luminotécnico.

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

Onde:
E_{EXT} – Iluminância horizontal difusa externa (lx)
E_{PT} – Iluminância no ponto (lx)
FLD_{PT} – Fator de luz diurna no ponto (%)

3.1.4. Verificar a autonomia da luz natural para o ponto (ALN_{PT})

A ALN_{PT} corresponde ao percentual de horas de ocupação da edificação atendidas apenas pela luz do dia. Ela é obtida por meio da curva de frequência de ocorrência de iluminância horizontal externa difusa da localidade. Tal curva é feita utilizando-se os dados de a iluminância horizontal difusa 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. Dessa forma, uma vez obtida a E_{EXT} por meio da Equação 1, verifica-se o ponto da curva referente a esse valor e rebate-se esse ponto para o eixo das ordenadas, obtendo-se a ALN_{PT}.

3.1.5. Cálculo da Densidade de Potência Instalada em Uso do Ambiente (DPIU)

A DPIU do ambiente é resultado da ponderação das densidades de potência de cada circuito, determinado pelo tipo de controle das luminárias, pela sua respectiva área de influência, conforme Equação 2.

$$DPIU = \frac{[(A_{ZIA} * DPI_{ZIA}) + \sum_{i=0}^{n}(A_{ZILNn} * (1 - ALN_{PT})]}{A_A} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:
DPIU – Densidade de potência instalada em uso do ambiente (W/m²)
A_{ZIA} – Área da zona com iluminação artificial remanescente desprovida de sensores de iluminação natural (m²)
DPI_{ZIA} – Densidade de potência instalada remanescente desprovida de sensores de iluminação natural (W/m²)
A_{ZILN} – Área da zona de iluminação natural com sensores de iluminação natural (m²)
ALN_{PT} – Autonomia de Luz Natural no Ponto
n – Quantidade de zonas com sensores de luz natural
A_A – Área de toda a zona térmica ou porção da edificação em avaliação (m²)

3.1.6. Cálculo do Consumo de Iluminação

O consumo de iluminação, incluindo a economia gerada pelos sensores de iluminação natural, consiste no produto área do ambiente pela DPIU calculada no item anterior, pelas horas de ocupação do ambiente.

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

Onde:
Consumo total – Consumo referente a um ano (kWh)
DPIU – Densidade de potência instalada em uso do ambiente (W/m²)
h – Quantidade de horas de ocupação em um ano
A_A – Área do ambiente (m²)

3.2. Avaliação do potencial do método

Para ilustrar a aplicação do método proposto, bem como efetuar a avaliação do seu potencial de aplicação, foi apresentado um estudo de caso. A avaliação do potencial do método foi dividida em duas etapas:

1. verificação da pertinência da escolha do ponto com menor provisão de luz natural da área de influência de um conjunto de luminárias para a verificação da autonomia da luz natural; e
2. avaliação do potencial da aplicação do método da prEN 17037:2018 (CEN, 2018) para a estimativa de consumo de iluminação com diferentes tipos de controles de iluminação natural.

O estudo de caso trata da análise de uma sala de aula. O ambiente escolhido foi avaliado com dois cenários para o sistema de iluminação, dois tipos de controle desse sistema, supondo a sua localização em três cidades diferentes, considerando-se as quatro orientações cardeais, totalizando 48 casos estudados. O ambiente, ilustrado na Figura 2, possui planta quadrada, com 6 m de largura por 6 m de profundidade e pé direito de 3 m. Há uma única abertura em fita com 5,8m de comprimento por 1m de altura e peitoril à 1,1m. As propriedades ópticas das superfícies do ambiente foram descritas na Tabela 1.

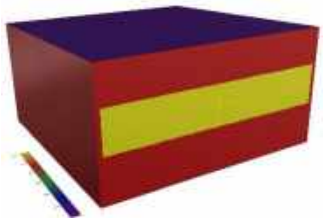


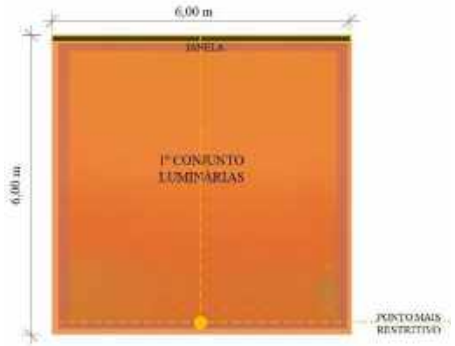
Figura 2– Representação tridimensional do modelo de ambiente

Tabela 1 – Propriedades dos materiais atribuídos às superfícies

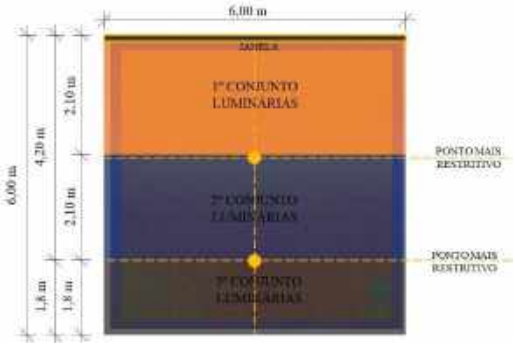
Superfície	Propriedade dos materiais	
	Refletância [%]	Transmissão visível [%]
paredes	50	-
teto	70	-
piso	20	-
janela	-	88

A iluminância de referência para salas de aula, estabelecida pela ABNT ISO/CIE 8.995:1 (ABNT, 2013), e escolhida como alvo, foi de 300lx. Estabeleceu-se um horário de ocupação de 10 horas, das 8 h até as 18 h. A DPI escolhida foi de 15,5 W/m², correspondente à classe D para escolas do método do edifício completo da INI-C (INMETRO, 2018).

Os dois cenários de iluminação foram propostos visando-se observar a influência da locação dos sensores de iluminação. No primeiro cenário, o caso 1, estipulou-se que apenas um sensor controlasse toda a potência instalada da sala, ver Figura 3a. Nesse caso, a zona controlada por sensores estaria excedendo em apenas 75cm, a medida da profundidade de uma zona de iluminação natural, calculada segundo regras de ouro, para ambientes sem dispositivos de controle solar (REINHART e LOVERSO, 2010). De acordo com tais regras, a profundidade da zona seria de 2,5 vezes a altura da verga da janela. No segundo, o caso 2, dividiu-se a potência instalada em 3 grupos de luminárias, ver Figura 3b. Para a setorização dos sensores, utilizou-se o conceito de zona primária e secundária de luz natural das normas Title 24 (2016) e ASHRAE 90.1 (2016). Essas referências, adotam a medida de uma vez a altura da verga como profundidade da zona primária de luz natural, para aberturas laterais, e de duas vezes a altura da verga, da zona secundária. Assumiu-se que cada uma dessas zonas fosse controlada por sensores independentes de luz natural e o restante do ambiente não possuísse controles, tendo a sua potência acionada integralmente. Dessa forma, o primeiro conjunto abrangeu a área correspondente à profundidade de 2,1m distante da janela (uma vez a altura da verga), o segundo, iniciado na sequência do primeiro até 4,2m (duas vezes a altura da verga) e o terceiro, iniciado a partir do segundo, até o final da sala, 6m distante, ver Figura 3b.



(a) Caso 1



(b) Caso 2

Figura 3 – Distribuição das luminárias

Ambos os cenários descritos foram testados com sensores com dimerização ideal e com sensores com dois passos, conforme o disposto na Tabela 2.

As três cidades escolhidas para as avaliações da sala de aula foram: Montes Claros (MG), Salvador (BA) e Porto Alegre (RS). Para a escolha das cidades realizou-se o cálculo da iluminância externa difusa mediana

Tabela 2 – Configurações do dispositivo de controle do sistema de iluminação

Controle do sistema de iluminação artificial			
	Caso 1	Caso 2	
Distribuição das luminárias	**Toda a área**	**Zona 1**	**Zona 2**
Operação:	dimerização ideal e controle com dois passos		
Potência de iluminação (W):	558,0	195,3	195,3
	300	Primeiro passo: 300	

para 25 cidades brasileiras, todas da zona 1 do zoneamento luminoso de Pereira, Schmitt e Moraes, 2015, utilizando-se o método de cálculo da prEN 17037:2018 (CEN, 2018). Com base nesses resultados, escolheram-se as três que representavam a mediana mais alta, a intermediária e a mais baixa.

Iluminância alvo do sistema "setpoint" (lx):		Segundo Passo 150	
Fator de perda "ballast" (%):	0	0	0
Potência de espera "standby" (W):	0	0	0

3.2.1. Ponto com menor provisão de luz natural da área de influência de um conjunto de luminárias para a verificação da autonomia da luz natural

Para verificar a pertinência da utilização do ponto caracterizado pela condição menos favorável quanto à iluminação natural para a estimativa da autonomia de luz natural, os resultados obtidos pelo método simplificado foram comparados à resultados simulados, utilizando-se a simulação anual completa, baseada no clima. A autonomia da luz natural – DA representa o percentual de horas em que é garantida uma iluminância mínima no plano de trabalho apenas com a luz natural (REINHART; MORRISON, 2003).

Tabela 3 – Parâmetros do *Radiance* adotados para a simulação computacional

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
Amostragem direta	0

As simulações foram realizadas no plug-in *DIVA-for-Rhino* (SOLEMMA LLC, 2014) do programa *Rhinoceros* (MCNEEL; ASSOCIATES, 2014), com arquivos climáticos EPW-INMET (LABEEE, 2018). A malha de pontos adotada foi distribuída ao longo de toda a área, sendo cada ponto espaçado 0,5m um do outro e com altura em relação ao piso de 0,75m. Os parâmetros de *Radiance* (WARD, 1994) foram configurados de acordo com a Tabela 3.

A comparação entre os resultados foi feita por análise de erros, sendo considerado o erro percentual de cada caso (EPt), de acordo com a equação 4. O resultado da simulação foi considerado o valor observado (Zt), por aproximar-se mais à realidade e o resultado do método simplificado, o valor estimado ($\hat{Z}t$), por ser o objeto de verificação. Adicionalmente, foi analisada a correlação entre os resultados.

$$EP_t = \left(\frac{Z_t - \hat{Z}_t}{Z_t}\right) \times 100 \qquad \text{Equação 4}$$

Onde:
EP_t: erro percentual no período t;
Z_t representa o valor observado no período t; e
$\hat{Z}_t$: corresponde ao valor estimado pelo modelo no período t

3.2.2. Avaliação do potencial da aplicação do método da prEN 17037:2018 para a estimativa de consumo de iluminação com diferentes tipos de controles de iluminação natural

O potencial do método simplificado para a estimar do consumo de iluminação foi verificado pela comparação entre os resultados da sua aplicação aos canários do estudo de caso e resultados obtidos por simulação computacional. As simulações são as mesmas descritas item 3.2.1. Para analisar a precisão do método frente a sistemas de iluminação com diferentes tipos de controles, os seus resultados foram confrontados com os resultados das simulações, considerando-se os dois tipos de controle: a dimerização ideal e o sensor de passos. No primeiro caso, os valores de consumo foram obtidos diretamente das simulações. O programa de simulação utilizado não possui a opção de sensor de passos. Dessa forma, no segundo caso, utilizaram-se dados do arquivo *.intgain, gerado após a simulação, para calcular o consumo do ambiente. Esse arquivo contém o percentual da potência acionada, por conjunto de sensores, para cada hora do ano. Considerou-se que os sensores teriam, dois passos: um de 0 a 149 lx, em que toda a potência estaria ativada, e outro de 150 lx a 299 lx, em que metade da potência estaria ativada. Com base nessas duas condicionantes obteve-se a quantidade de horas em que os sensores estariam ativados. Essa quantidade foi multiplica pela DPI de 15,5 W/m² e pela área de abrangência dos sensores, obtendo-se o consumo de iluminação.

Como resultado foram gerados gráficos de correlação para cada orientação comparando as duas formas de controle de iluminação com os resultados obtidos pelo método simplificado.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Aplicação do método ao estudo de caso

Com base na sequência estabelecida no item 3.1, realizou-se o cálculo do método simplificado para todas as cidades, com os dois casos de distribuição de sensores. Como o método simplificado não é sensível ao tipo de operação dos sensores, a diferenciação entre o sistema de dimerização ideal e o de passos será observada somente na verificação do consumo de iluminação obtido pela simulação.

4.1.1. Identificar o ponto mais restritivo nas zonas controladas por sensores:

Os pontos, para o caso 1 e para o caso 2, foram identificados em amarelo nas figuras 3 e 4 do item 3.2, respectivamente.

4.1.2. Calcular o fator de luz diurna para o ponto:

Obteve-se o FLD_{PT} utilizando-se o plug-in DIVA-for-Rhino, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Fator de Luz Diurna do ponto [%]

	CASO 1	CASO 2	
Cidade	**Toda área**	**Zona 1**	**Zona 2**
MONTES CLAROS	1,2	5,2	1,6
SALVADOR			
PORTO ALEGRE			

4.1.3. Calcular a Iluminância Horizontal Difusa Externa (E_{EXT}):

Calculou-se a E_{EXT} pela Equação 1. A iluminância alvo adotada foi de 300 lx e os FLD_{PT} para cada caso, foram os presentes na Tabela 4. Os resultados foram apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Iluminância Horizontal Difusa Externa [lx]

	CASO 1	CASO 2	
Cidade	**Toda área**	**Zona 1**	**Zona 2**
MONTES CLAROS	25000	5769,23	18750
SALVADOR			
PORTO ALEGRE			

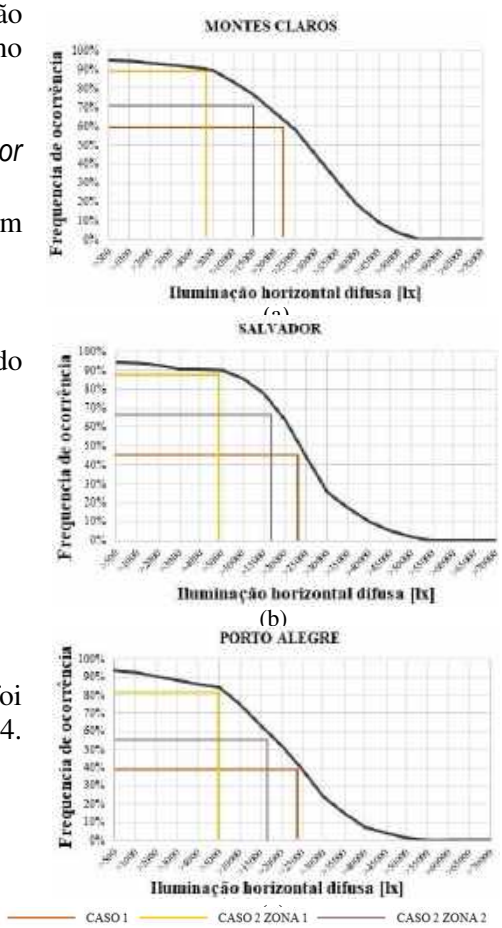


Figura 4 – Curvas de Frequência de Ocorrência da E_{EXT} de Cada Cidade

4.1.4 Verificar a Autonomia de Luz Natural (ALN_{PT}):

Com base na E_{EXT} de cada caso, presente na Tabela 5, e na curva de frequência de cada cidade (ver figura 4) obtiveram-se os valores de ALN_{PT} apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Autonomia de Luz Natural

	CASO 1	CASO 2	
Cidade	**Toda área**	**Zona 1**	**Zona 2**
MONTES CLAROS	59%	88%	70%
SALVADOR	46%	88%	68%
PORTO ALEGRE	40%	81%	55%

4.1.5 Cálculo da Densidade de Potência Instalada em Uso do Ambiente (DPIU):

Para o cálculo da DPIU utilizou-se a Equação 2. A DPI correspondeu a 15,5 W/m². As áreas de influência de cada circuito foram: Caso 1 – $A_{ZIA} = 0$ e $A_{ZILN} = 36$ m²; Caso 2 – $A_{ZIA} = 10{,}80$ m², $A_{ZILN1} = 12{,}60$ m² e $A_{ZILN2} = 12{,}60$ m². As DPIU resultantes, para cada caso, foram apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – DPI_U [W/m²]

	CASO 1	CASO 2	
Cidade	**Toda área**	**Zona 1**	**Zona 2**
MONTES CLAROS	6,355	6,9285	
SALVADOR	8,37	7,04	
PORTO ALEGRE	9,3	8,12	

4.1.6. Cálculo do Consumo:

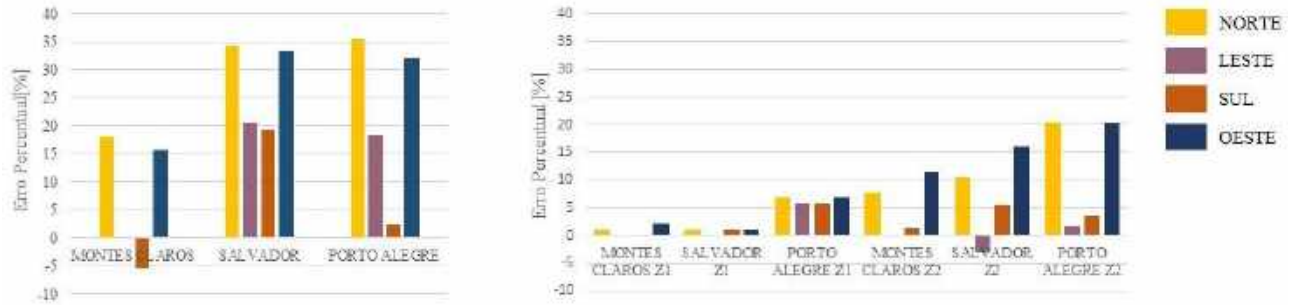
O cálculo do consumo foi feito com a Equação 3. Considerou-se o horário de ocupação de 10 h, nos 365 dias do ano. A área do ambiente foi de 36m². Os resultados foram apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Consumo de iluminação [KWh]

	CASO 1	CASO 2	
Cidade	**Toda área**	**Zona 1**	**Zona 2**
MONTES CLAROS	835,05	910,41	
SALVADOR	1099,82	924,66	
PORTO ALEGRE	1222,02	1067,23	

4.2. Análise da adoção da ALN_{PT} para simular o padrão de uso dos sensores de iluminação

Os gráficos ilustrando os erros percentuais, calculados segundo a Equação 4, resultantes da comparação entre as previsões da simulação computacional e do método simplificado, são apresentados na Figura 5. Observou-se que, na maior parte dos casos, o método simplificado subestima o potencial lumínico da edificação, visto que contabiliza apenas a contribuição da luz difusa. As exceções foram observadas em dois casos, para o Caso 1, na orientação sul em Montes Claros e para o Caso 2, na orientação leste, em Salvador. O fato de o método simplificado não diferenciar o desempenho luminoso para as diferentes orientações e considerar apenas a luz difusa, faz com que os menores erros ocorram para as orientações que com menos luz.



(a) Caso 1 (b) Caso 2

Figura 5 – Erro percentual entre as simulações e o método simplificado para a estimativa da autonomia da luz natural

Também foi percebido que, quanto mais divididas as áreas de atuação dos sensores de iluminação, mais precisos são os resultados do método simplificado. No caso 2, onde foram utilizados três grupos de luminárias, o percentual de erro máximo foi de 21% (ver Figura 5b), enquanto que na sala onde há um único grupo, passou de 35% (ver Figura 5a). Observou-se também que, quanto mais afastado da abertura estiver o ponto de avaliação, menos precisa será a estimativa do método simplificado para definição da ALN_{PT}. Atribuiu-se o aumento do erro à distância da abertura, e não à área de abrangência do sensor, visto que houve aumento de erro da zona 1 para a zona 2 do caso 2, em que ambas as zonas têm a mesma área.

A Figura 6 apresenta os gráficos de correlação entre o DA do ponto, obtido pelas simulações, e a ALN_{PT}, calculada pelo método simplificado, para as quatro orientações. Os pontos correspondem a todos os casos estudados, caso 1 e caso 2, para dois sistemas de controle, para as três cidades. Ao avaliar os gráficos nota-se que a correlação mais forte ocorreu para a orientação oeste, seguida da norte, da leste e da sul, com os valores sendo 0,955, 0,9499, 0,9495, 0,9365, respectivamente. Esses resultados indicam a validade de se utilizar o ponto mais restritivo de um conjunto de luminárias para verificar a autonomia de luz natural.

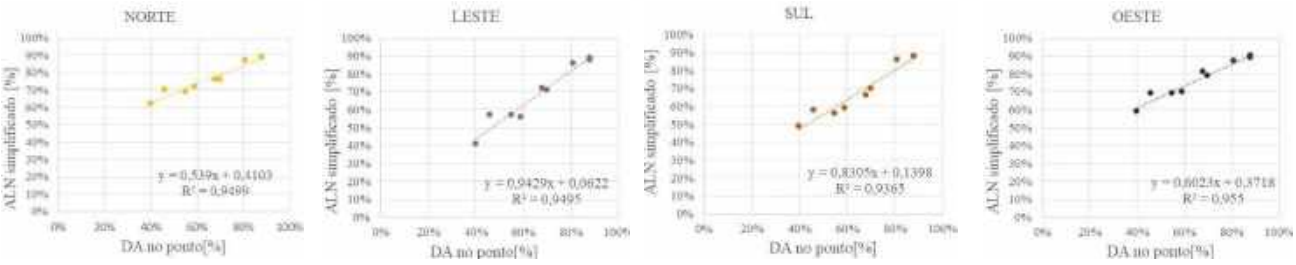


Figura 6 – Correlação entre o DA simulado e a ALN do método simplificado

4.3. Potencial da aplicação do método simplificado para a estimativa de consumo de iluminação

A Figura 7 traz os gráficos de correlação entre os resultados de consumo do método simplificado e os da simulação. Da mesma forma que no item anterior, os pontos correspondem a todos os casos estudados. A orientação que apresentou correlação mais forte entre os dados foi a leste, com coeficiente de determinação de 0,8366 e a mais fraca, a oeste, com 0,8003. Esses resultados indicam que o método pode ser aplicado para as diversas orientações com desempenho semelhante. As orientações sul e oeste, de menor R^2, foram as que apresentaram os valores mais altos e baixos de consumo, respectivamente. O fato destas duas orientações apresentarem os resultados extremos do conjunto de dados, obtidos pela simulação, pode ter influenciado na correlação mais fraca com o simplificado, já que mesmo não é sensível à orientação.

Ao se avaliar os gráficos, percebe-se grupos de pontos decorrentes do sistema de iluminação representado por eles, bem como da divisão dos circuitos controlados pelos sensores. Para ilustrar melhor esse resultado, tais grupos foram destacados na Figura 8, alusiva à orientação norte. Os pontos referentes à

dimerização ideal concentraram-se acima da linha de tendência, enquanto que os referentes ao controle de passos, abaixo. Além disso, há uma clara separação entre os consumos dos dois casos apresentados, sendo o Caso 1, com valores mais elevados. Esse resultado se justifica pelo Caso 1 apresentar o ponto mais restritivo da zona controlada pelos sensores mais distante da abertura. O que mostra que a adequada divisão dos circuitos controlados pelos sensores pode impactar significativamente no consumo.

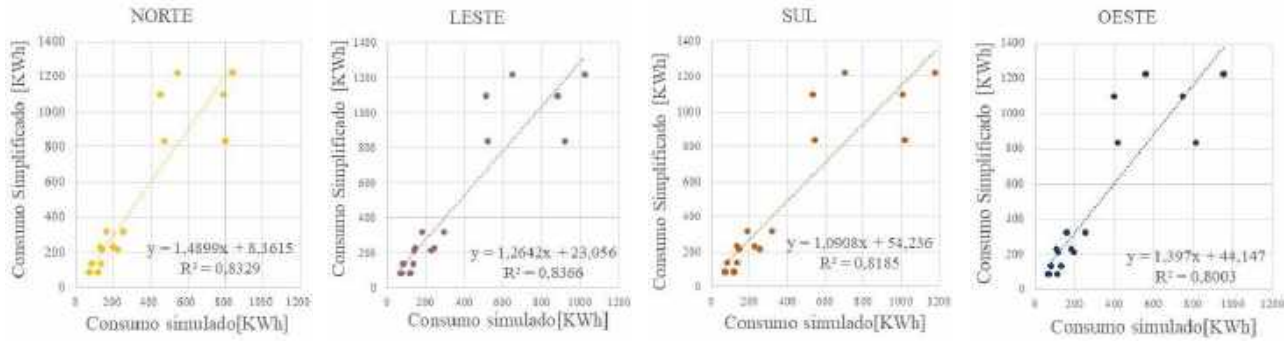


Figura 7 – Correlação entre consumo simulado e o consumo do método simplificado

Na tabela 8 foi especificado o grau de correlação quando observados separadamente cada tipo sensor. A primeira coluna traz os coeficientes de determinação para todos os casos, já apresentados anteriormente na Figura 7. Já a segunda e a terceira coluna, trazem os coeficientes de determinação quando avaliados os casos apenas com controle dimerizável e com controle de passos, respectivamente. Para todos os casos, a correlação tornou-se mais forte, quando os casos com diferentes sensores foram separados. O sensor dimerizável apresentou correlação mais forte do que o de passos para as quatro orientações. As orientações mais beneficiadas pela separação foram a sul e a oeste.

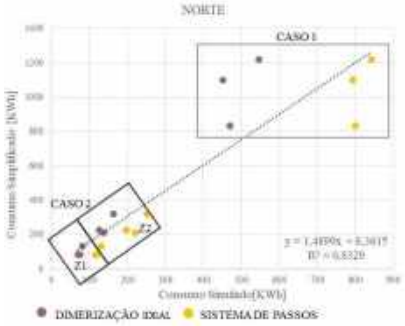


Figura 8–Agrupamento de pontos no gráfico de Consumo

Tabela 8 – Correlação entre consumos por orientação

Correlação entre Simplificado e Simulação			
Cidade	**Dimmer + Passos**	**Dimmer**	**Passos**
NORTE	0,8329	0,9689	0,9603
SUL	0,8185	0,9748	0,9725
LESTE	0,8366	0,9756	0,9644
OESTE	0,8003	0,96941	0,9616

5. CONCLUSÕES

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. Foram testadas a pertinência da escolha de um único ponto, localizado na porção de menor disponibilidade de luz da área de influência de um sensor de luz natural, para simular o seu padrão de uso e o potencial do método para estimar o consumo de iluminação propriamente dito. O método foi avaliado frente ao consumo obtido por dois tipos de sensores, dimerizável e de passos. A influência da discretização do zoneamento das áreas controladas pelos sensores também foi avaliada.

Os resultados mostram que o método simplificado, em geral, subestima o aproveitamento da luz natural. Mostraram também que, a forma de distribuição dos sensores afeta o seu desempenho. O método apresentou resultados mais precisos para o zoneamento de luz natural mais refinado, o do Caso 2.

Quanto à pertinência da escolha do ponto mais restritivo, jugou-se que a precisão obtida para a zona primária de luz natural é aceitável, com erros menores do que 7% para todas as cidades e orientações. Já para zonas mais distantes da janela, como a secundária, devem ser realizados mais testes, visto que os erros obtidos para Porto Alegre chegaram a 20%, mas os de Montes Claros não passaram de 12%. A precisão da escolha do ponto mais restritivo para áreas muito grandes controladas por um único sensor, como o Caso 1, foi considerada insuficiente. Recomenda-se que sejam realizados mais teste para determinar um limite de aplicação do método, de acordo com a distância do ponto mais restritivo da zona em relação à fonte de luz. Com base na análise de correlação entre o DA e a ALN_{PT}, acredita-se que a utilização do ponto mais restritivo para tal verificação é válida, com cautela para orientação sul, para a qual os resultados podem ser superestimados.

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, visto tratar-se de uma proposta simplificada, que conceitualmente, possui limitações inerentes a sua natureza. Concluiu-se que o método simplificado tem potencial para simular a operação dos dois tipos de sensores testados, com maior precisão para os dimerizáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE. Standard 90.1 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings **I. Ansi/Ashrae/Ies- 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.

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

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

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. **I. E. C. E. Ministério Do Desenvolvimento**. 2Rule.Portaria n. 372.INMETRO. N. 87.2010.

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

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.

MCNEEL, R.; ASSOCIATES. **Rhinoceros 3D**.v. 5. Rhinoceros 3D é um programa de modelagem tridimensional baseado na tecnologia NURBS. 2014

MORAES, L.N.; PEREIRA, F.O.R. Um método para avaliação do desempenho dinâmico da iluminação natural. In: XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 2011.Búzios - RJ. **Anais do XII ENCAC e VII ELACAC**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2011. v1, p1-10.

REINHART, C.; MORRISON, M. **The lightswitch wizard – reliable daylight simulations for initial design investigation**. In: Building Simulation. Eindhoven, The Netherlands, 2003. p. 1093-1100. 2003.

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.

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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES/PNPD a ao CNPq (Bolsista do CNPq - Brasil 151988/2018-8, bolsista do CNPq – Brasil 307179/2016-8 e PIBIC/UFSC) pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.