

Estudo comparativo de sistemas de iluminação artificial considerando luz natural e consumo de energia

Comparative study of artificial lighting systems considering daylight and energy consumption

Letícia Niero Moraes
Anderson Claro

Resumo

Além do aproveitamento da iluminação natural, indicado como um fator primordial na economia de energia das edificações, o posicionamento das luminárias bem como de suas especificações pode contribuir para o conforto ambiental e a conservação de energia. Essas preocupações, no entanto, não fazem parte da prática atualmente estabelecida pelos profissionais de iluminação. Considerando essa lacuna, o presente trabalho visa desenvolver um estudo que aborda a avaliação de diferentes sistemas de iluminação artificial. A metodologia da pesquisa é baseada na avaliação do desempenho luminoso, como uniformidade, níveis e distribuição de iluminâncias, e consumo de energia de sistemas de iluminação artificial, através de simulação computacional. As análises de aproveitamento da luz natural foram utilizadas para uma estimativa simplificada do consumo energético para diferentes sistemas de iluminação artificial, através da divisão de circuitos de acionamento. Os sistemas de iluminação artificial propostos eram diferenciados pelas fotometrias e disposições das luminárias. Os resultados mostram diferenças significativas quanto à distribuição da iluminação, assim como no consumo de energia, chegando a economias de até 46% em relação ao projeto-base. As principais contribuições deste estudo são a obtenção de critérios que conduzam a um melhor dimensionamento do sistema de iluminação artificial.

Palavras-chave: Iluminação natural. Iluminação artificial. Consumo de energia. Qualidade de iluminação.

Abstract

Besides the use of daylight, indicated as a primary factor in energy savings in buildings, the positioning of fixtures, as well as their specifications can contribute to environmental comfort and energy conservation. Such concerns, however, are not part of the currently established practice of lighting design professionals. Considering this gap, the aim of this paper is to conduct a study to assess different artificial lighting systems. The research methodology consists of evaluating the lighting performance, such as the uniformity, levels, and distribution of illuminance, as well as the estimated energy consumption of lighting systems through computer simulation. Analyses of daylight were used to make a simplified estimate of energy consumption for different proposals of lighting systems, by dividing the driver circuits. The proposed lighting systems had different photometries and position of the fixtures. The results show significant differences in lighting distribution, as well as in energy consumption, with savings of up to 46% compared with the base case. The main contribution of this study is to establish criteria that can improve the design of electric lighting systems.

Keywords: Daylighting. Artificial lighting. Energy consumption. Lighting quality.

Letícia Niero Moraes
Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Anderson Claro
Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Recebido em 06/01/13
Aceito em 04/09/13

Introdução

Existem muitos estudos que tratam de diferentes métodos para análise da disponibilidade de luz natural em projetos arquitetônicos e outros tantos sobre como utilizar os diferentes circuitos de uma dada instalação para obter mais eficiência (como sistemas de controle), caracterizando o fenômeno de forma satisfatória (SOUZA, 2003; DIDONÉ, 2009; ROCHA, 2012).

Com relação ao sistema de iluminação artificial, o foco das pesquisas reside na eficiência dos equipamentos que compõem o sistema, apontando quais as lâmpadas, luminárias e reatores mais eficientes. Porém, uma vez que se reconhece tal eficiência, é necessário o conhecimento do comportamento desses equipamentos quanto à distribuição da iluminação no espaço. Sabendo-se que o posicionamento e as especificações fotométricas das lâmpadas e luminárias podem contribuir de forma crucial para o conforto ambiental e para a conservação de energia, observa-se uma lacuna nos estudos do projeto de iluminação artificial em termos de níveis e distribuição de iluminâncias, aliada à eficiência energética do sistema, entre outras coisas.

Diversos métodos já foram propostos para resolver a questão da integração dos sistemas de iluminação natural e artificial, visando à economia de energia, abordando a necessidade do uso da iluminação artificial suplementar à natural; a maioria das propostas baseia-se na definição de zonas luminosas, áreas que apresentam uma distribuição semelhante de iluminação natural (ROBBINS, 1986). Entre eles, menciona-se o método IASPI, originalmente conhecido por PSALI – *Permanent Supplementary Artificial Lighting in Interiors* (MOORE, 1993), e o método PALN, proposto por Souza (2003). Diversos estudos surgiram a partir desses métodos, mostrando que é possível se atingir significativa economia de energia a partir do aproveitamento da luz natural, com o consequente controle da iluminação artificial (SABRY; FAGGAL, 2005; ROISIN *et al.*, 2008; DIDONÉ, 2009).

Apesar de existirem tais métodos e estudos acerca do tema, verifica-se que a definição “projeto de iluminação” ainda é vista de forma distinta por acadêmicos e profissionais atuantes no mercado de trabalho. Usualmente, em trabalhos científicos, o significado abrange iluminação natural e artificial; entretanto, fora do meio acadêmico, o termo é utilizado para designar exclusivamente o projeto de iluminação artificial (TOLEDO, 2008).

Tem-se visto também muita discussão a respeito das métricas utilizadas para especificar, medir e

calcular os níveis de iluminação, e questionamentos a respeito das recomendações presentes nos códigos e normas relacionadas à iluminação. A consideração do contexto, da atividade visual e os processos físicos e psicológicos que podem influenciar a percepção de qualidade de iluminação fazem com que uma receita única e universalmente aplicável para uma iluminação de boa qualidade com base nas quantidades fotométricas seja uma expectativa irreal (BOYCE, 2012).

O Método dos Lúmens é o método de cálculo do sistema de iluminação artificial mais utilizado, devido principalmente a sua facilidade de utilização (CUTTLE, 2010). No caso da abordagem de iluminação uniforme, relacionada ao Método dos Lúmens, ressalta-se que método não define um espaçamento entre as luminárias, mas sim um fluxo luminoso total necessário para fornecer determinado nível de iluminância predeterminado dentro de um espaço (com base na tarefa a ser desempenhada) e o número necessário de luminárias que atende a esse fluxo. Salienta-se que não existem regras para a distribuição das luminárias, sendo o que rege a prática projetual para iluminação geral recomendações resultantes do próprio exercício prático, definindo critérios de espaçamento uniforme em função da geometria do ambiente e do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas.

Embora tenha uma aplicação simples, o Método dos Lúmens apresenta problemas de precisão de dimensionamento, o que fez surgir propostas de métodos visando a sua correção. Alguns trabalhos (ALBUQUERQUE, 2007; SHIKDER; MOURSHED; PRICE, 2010; CASSOL *et al.*, 2011) mostraram que a uniformidade de distribuição da iluminância no plano de trabalho não está relacionada à distribuição uniforme das luminárias no teto (Figura 1). No entanto, as metodologias apresentadas nestes trabalhos utilizam recursos computacionais e formulações matemáticas avançadas, inaplicáveis à prática projetual utilizando o Método dos Lúmens.

O balanço entre o número de luminárias, a distribuição e potência delas e a uniformidade da iluminância faz com que a melhor configuração fique atrelada às necessidades do projeto, por aspectos visuais, econômicos e estéticos. Dessa forma, cabe ao projetista decidir a melhor configuração do projeto de iluminação, assim como a escolha eficiente dos equipamentos e a preocupação com o aproveitamento da iluminação natural. Para isso, é necessário que o projetista tenha conhecimento das alternativas disponíveis,

para assim decidir os componentes e o conceito do sistema de iluminação, que influem significativamente em sua eficiência e qualidade.

Neste estudo, a partir da práxis atual, são estudados comparativamente projetos luminotécnicos utilizando diferentes tipos de luminárias, aqui consideradas o principal componente do sistema, tendo como preocupação o comportamento desses sistemas em relação a dada exigência de qualidade de iluminação.

Diante do exposto, o objetivo deste artigo é investigar os critérios e o impacto de projetos de sistemas de iluminação artificial com diferentes luminárias através da análise de desempenho de indicadores de nível de iluminação e distribuição luminosa, considerando a possibilidade de aproveitamento da luz natural através de um sistema de controle da iluminação artificial.

O balanço entre o número de luminárias, a distribuição e potência delas e a uniformidade da iluminância faz com que a melhor configuração fique atrelada às necessidades do projeto, por aspectos visuais, econômicos e estéticos. Dessa forma, cabe ao projetista decidir a melhor configuração do projeto de iluminação, assim como a escolha eficiente dos equipamentos e a preocupação com o aproveitamento da iluminação natural. Para isso, é necessário que o projetista tenha conhecimento das alternativas disponíveis, para assim decidir os componentes e o conceito do sistema de iluminação, que influem significativamente em sua eficiência e qualidade.

Neste estudo, a partir da práxis atual, são estudados comparativamente projetos luminotécnicos utilizando diferentes tipos de luminárias, aqui consideradas o principal componente do sistema, tendo como preocupação o comportamento desses sistemas em relação a dada exigência de qualidade de iluminação.

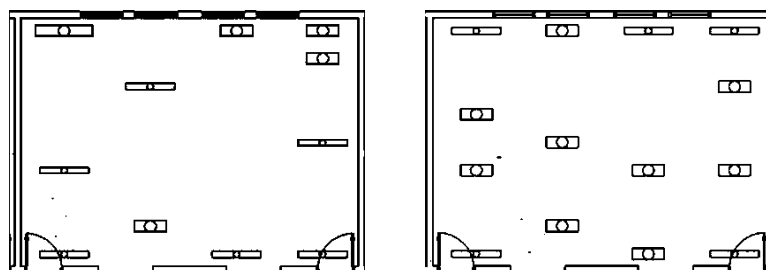
Diante do exposto, o objetivo deste artigo é investigar os critérios e o impacto de projetos de sistemas de iluminação artificial com diferentes luminárias através da análise de desempenho de indicadores de nível de iluminação e distribuição luminosa, considerando a possibilidade de aproveitamento da luz natural através de um sistema de controle da iluminação artificial.

Método

A metodologia adotada é baseada na avaliação e na comparação de diferentes sistemas de iluminação artificial, através de resultados obtidos por simulação computacional. O foco do estudo é comparar diferentes distribuições e tipos de luminárias, considerando níveis de iluminância e uniformidade de sua distribuição, realizando uma estimativa de consumo de energia através do aproveitamento da luz natural. Ressalta-se que o objetivo do trabalho não é avaliar diferentes condições de disponibilidade de luz natural, e sim considerar a possibilidade de uso da luz natural para a análise dos projetos luminotécnicos quanto a sua influência no consumo de energia. A meta é verificar as diferenças de consumo produzidas por diferentes projetos luminotécnicos, diante do aproveitamento da luz natural e do controle da iluminação artificial.

Inicialmente, são construídos dois modelos-base para as simulações, localizados na cidade de Florianópolis, SC. Através do programa Daysim são estimadas disponibilidades de iluminação natural nos modelos. De acordo com essa distribuição, são propostas zonas de iluminação, com o intuito de integrar os sistemas de iluminação natural e artificial através da divisão de circuitos de acionamento, que influenciarão na análise do consumo energético.

Figura 1 - Resultado de estudo com distribuições com diferentes luminária, que fornecem iluminação uniforme no plano de trabalho



Fonte: Albuquerque (2007).

Definidas as zonas, são selecionadas luminárias para compor as diferentes alternativas de sistemas de iluminação artificial. Primeiramente é utilizado o Método dos Lúmens. A partir dessa definição, são elaborados novos sistemas, diferenciados pelas fotometrias e disposições das luminárias. Inicialmente, são avaliados níveis de iluminância e uniformidade de distribuição. Esse procedimento é realizado para cada linha selecionada de luminárias e, dentro de cada linha, para cada tipo escolhido. Os projetos que, para cada tipo/linha de luminárias, obtiveram melhor desempenho diante dos parâmetros analisados são selecionados e avaliados quanto ao consumo energético.

Modelos de análise

A análise é realizada em dois modelos hipotéticos de escritórios de planta livre, sem mobília, com grande área e profundidade, com o intuito de se obter maior variação nos níveis de iluminação natural e permitir variabilidade na distribuição das luminárias. O modelo 01 (M01) é um ambiente retangular de abertura unilateral voltada para o norte, com área de 250 m². O modelo 02 (M02) é um ambiente em formato “L”, com duas aberturas na mesma fachada, e uma área de 252 m², conforme a Figura 2. Adota-se um percentual de abertura na fachada (PAF) médio de 50%.

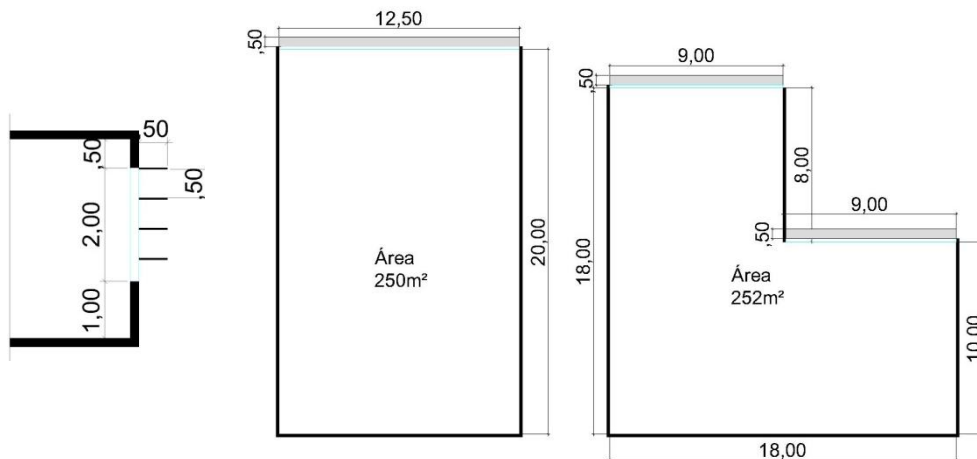
A adoção de um modelo em forma de “L” procura avaliar a aplicação do Método dos Lúmens e a concepção do projeto luminotécnico para

ambientes irregulares, porque programas computacionais que concebem o projeto luminotécnico através do Método dos Lúmens, gerando uma distribuição uniforme das luminárias automaticamente, só realizam os cálculos para ambientes retangulares ou quadrados. Como o objetivo é avaliar os sistemas de iluminação artificial a partir de dada disponibilidade de luz natural, e não esta propriamente dita, apenas dois modelos são utilizados, com apenas uma configuração de abertura e orientação.

Parte-se do pressuposto do controle da radiação solar direta no interior do ambiente, para fins de projeto luminotécnico, com o objetivo de evitar que o usuário feche as cortinas e influencie na admissão de luz natural. Assim, adota-se uma configuração de protetores solares horizontais com dimensões de 0,5 m x 0,5 m (refletância de 50%) intercalados a cada 0,5 m. Esta configuração visa minimizar o efeito do ofuscamento pela luz direta do Sol, mas sem aprofundar seus desdobramentos, devido a sua variabilidade e complexidade.

As refletâncias das superfícies internas do ambiente são definidas com base nas tabelas do fator de utilização (Cu) dos fabricantes das luminárias, por se utilizar o Método dos Lúmens para a estimativa do número de luminárias. Para este estudo, o teto apresenta 70% de reflexão, as paredes 50%, e o piso 10%, sendo o valor das refletâncias caracterizado como 751.

Figura 2 - Configuração das proteções solares e geometria dos modelos (sem escala)



Estimativa da disponibilidade de luz natural

Para esta etapa é utilizado o conceito de zonas luminosas, áreas que apresentam uma distribuição semelhante de iluminação natural (ROBBINS, 1986). Adota-se um conceito de zoneamento da luz natural utilizando uma medida dinâmica de avaliação – Autonomia da Luz Natural (DA) (REINHART; MORRISON, 2003), que possibilita a identificação da percentagem de tempo em que é necessário o uso do sistema de iluminação artificial durante o ano. É utilizado apenas um modelo simplificado de controle da iluminação artificial do tipo liga/desliga, possibilitando ligar ou desligar totalmente o circuito ou metade dele em cada zona, também denominado de controle por passos. O método para o cálculo de economia de energia empregado, sugerido por Souza (2003), adota também o conceito de zoneamento da iluminação natural.

Como não existem ainda indicações para a divisão de zonas considerando uma medida dinâmica de avaliação, adotaram-se os princípios de zoneamento das salas simuladas por Souza (2003) e a consideração de Didoné (2009): entre 0% e 20% de DA o consumo de energia dos sistemas de iluminação artificial é mais elevado, pois precisa ficar ligado o maior tempo durante o ano, e acima de 80% o sistema artificial pode ser desligado.

Neste trabalho são identificadas três zonas: uma zona com autonomia de 0% a 20%, onde será necessário o uso de sistemas artificiais durante todo o tempo ao longo do ano; outra zona com autonomies maiores que 80%, fato que implica o desligamento total do sistema artificial (nas zonas próximas à janela); e, por último, uma zona com autonomies intermediárias, que apresentam grandes variações de valores (de 20% a 80%), o que implica o acionamento parcial do sistema de iluminação artificial. Assim, são definidos intervalos de valores de DA de 0-20%, 20-80% e 80-100%.

Para a identificação desses intervalos, são calculadas, com o programa Daysim, autonomies para dois valores de iluminâncias – 250 e 500 lux. Os dados resultantes das simulações são inseridos no programa Winsurf, permitindo a visualização gráfica dos resultados através de curvas de autonomia da luz natural – isoDA. Com os gráficos isoDA para os dois valores de DA, são identificados e marcados os intervalos de valores de DA de 0-20%, 20-80% e 80-100%, em cada gráfico.

No gráfico DA 250 lux, é delimitada a zona 3, que corresponde àquela onde a luz natural nunca atinge

250 lux, necessitando do sistema de iluminação artificial completamente ativo para fornecer a iluminação adequada. A zona 2 é delimitada através do somatório do intervalo 20-80% para cada valor de DA. Já a zona 1 é identificada no gráfico DA 500 lux, onde acima de 80% do tempo há autonomia da luz natural para esse valor de iluminância, implicando o desligamento total do sistema artificial.

Definição dos sistemas artificiais

Os projetos são elaborados inicialmente com base no Método dos Lúmens, com um único tipo de luminária e com distribuição uniforme. Nesta etapa, os critérios de distribuição das luminárias são a distância entre as luminárias é o dobro da distância entre estas e as paredes laterais, não ultrapassando 1,5 vez a altura de montagem entre a luminária e o plano de trabalho ($e = 1,5 L$), e as luminárias possuem orientação no sentido longitudinal (0 grau, maior dimensão paralela à abertura). Para esta primeira etapa, os projetos são identificados pela nomenclatura “original”.

O projeto luminotécnico inicia-se com uma estimativa do número de luminárias necessárias para atingir um nível de iluminância de referência de 600 lux, sugerindo que o fator de depreciação (F_d) está incluso no valor da iluminância (500 lux), ou seja, em vez da consideração do F_d igual a 0,8 (usualmente utilizado), considera-se F_d igual 1. Embora a integração com a luz natural seja analisada em função de 500 lux, a adoção de 600 lux visa avaliar os sistemas no início de sua implantação, desconsiderando as depreciações ao longo do tempo, mesmo esta não sendo avaliada no estudo.

A síntese dos parâmetros utilizados na simulação é apresentada na Tabela 1.

As luminárias utilizadas são as mais comumente encontradas para iluminação geral em ambientes de escritórios. Os equipamentos são selecionados por meio de consulta ao catálogo do fabricante LightGroup (www.lightgroup.com.br), devido à compatibilidade dos arquivos fotométricos digitais com o programa LightTool (CLARO, 1998), utilizado para a simulações dos sistemas de iluminação artificial. São estudadas quatro linhas de luminárias, conforme o Quadro 1, com 13 luminárias compostas de lâmpadas fluorescentes tubulares T8 (Tabela 2). Apesar de existirem lâmpadas T5 com fluxo luminoso de 2.900 lumens, optou-se por lâmpadas T8, por estas estarem disponíveis para todas as linhas de luminárias utilizadas.

Reformulações dos sistemas de iluminação artificial

Baseando-se nas constatações realizadas sobre os sistemas originais e também sobre estudos anteriores, foram identificadas características que poderiam ser investigadas para a melhor concepção do projeto luminotécnico. Dessa forma,

são elaboradas oito reformulações dos sistemas de iluminação artificial, que procuram verificar a influência de critérios como espaçamento, orientação e distribuição das luminárias no comportamento da iluminação (Figuras 3 e 4). A síntese das reformulações realizadas é apresentada no Quadro 2.

Tabela 1 - Parâmetros para a simulação - iluminação artificial

Iluminância de projeto	Fator de depreciação (<i>Fd</i>)	Fator de manutenção	Fator de utilização (<i>Cu</i>)
600 lux	1	100%	Catálogo do fabricante

Quadro 1 - Descrição das linhas de luminárias selecionadas





Linha	BNI 3312	DBL 3391	OCT 1369	DIF 2351
				
Corpo	Branco	Branco	Branco	Branco
Aletas	Branco	Alumínio	-	-
Refletores	Alumínio	Alumínio	Alumínio	-
Difusor	-	-	-	Prismático

Tabela 2 - Descrição das linhas de luminárias selecionadas

Luminária	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência (lm/W)	Potência (W)
BNI 3312 2x16W	1.200	75	32
BNI 3312 2x32W	2.600	81,3	64
BNI 3312 4x16W	1.200	75	64
BNI3312 4x32W	2.700	84,3	128
DBL 3391 2x16W	1.200	75	32
DBL 3391 2x32W	2.700	84,3	64
DBL 3391 4x16W	1.200	75	64
DBL2391 4x32W	2.700	84,3	128
OCT 1369 2x16W	1.200	75	32
OCT 1369 2x32W	2.700	84,3	64
OCT 1369 1x32W	2.700	84,3	32
DIF2351 2x16W	1.200	75	32
DIF2351 2x32W	2.700	84,3	64

Figura 3 - Amostras das reformulações propostas para uma parcela do ambiente, para a luminária BNI2x32W - R03 não foram representadas porque variam de acordo com cada projeto

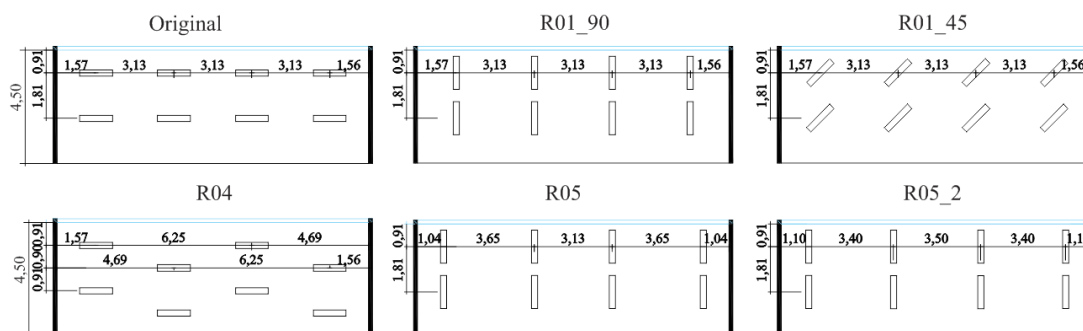
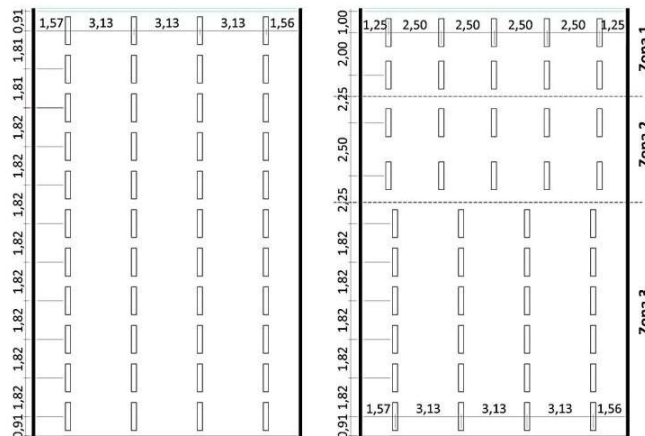


Figura 4 - Exemplo de Reformulação 02 para a luminária BNI2x32W



Quadro 2 - Descrição das reformulações propostas para os sistemas de iluminação artificial

R01_90	Mudança de orientação em 90 graus
R01_45	Mudança de orientação em 45 graus
R02	Distribuição uniforme em cada zona de luz natural
R03	Desconsideração do critério utilizado no projeto original: $e=1,5L$
R04	Sistema alternado, reduzindo-se os afastamentos entre as linhas à metade
R05	Redução dos afastamentos das luminárias próximas às paredes em 1/3 da distância entre as luminárias
R05_2	Aumento crescente do distanciamento das luminárias em relação ao centro do ambiente
R06	Distribuições circulares

Nesta etapa procura-se manter certa uniformidade de distribuição, mesmo se reconhecendo que a melhor distribuição, apontada em estudos anteriores, implica o uso de diferentes luminárias em um mesmo projeto e posições diferenciadas. Essa consideração deve-se ao fato de que, a partir do Método dos Lúmens, distribuições como às apontadas nos estudos tornam-se impraticáveis e também desagradáveis visualmente, uma vez que essas propostas de distribuição podem não ser bem aceitas caso o projetista busque valor estético para o ambiente. Isto também porque a melhor configuração muitas vezes está relacionada com as necessidades do projeto, que poderão influenciar a disposição das luminárias, como a modulação do forro e mobiliário, e as próprias recomendações que definem critérios de espaçamento uniformes.

Parâmetros de análise

Os resultados obtidos nas simulações são analisados em duas partes. Na primeira, é realizada a avaliação quanto à distribuição de iluminâncias e uniformidade do sistema, para todas as reformulações realizadas. Destas, os projetos que obtiveram melhor resultado nesta etapa são selecionados e comparados entre si, caracterizando a segunda parte da análise, quando é analisado o consumo energético de cada sistema.

Distribuição de iluminâncias e uniformidade

Para a análise do desempenho luminoso é utilizado um zoneamento de iluminâncias definidos sobre um nível mínimo de iluminação, que permite avaliar a adequação dos resultados de cálculo diante de uma iluminância de referência, utilizando para isso um gráfico de cinco categorias de cores. O programa LightTool oferece uma ferramenta que permite a visualização dessas zonas em curvas de iluminância - *isolux*, denominada “Análise de Zonas”, que foi utilizada neste trabalho. Essa ferramenta permite avaliar o quanto o projeto diverge, por falta ou por excesso, das determinações de referência da norma. O programa Winsurf é utilizado para a visualização gráfica apenas para a disponibilidade de iluminação natural, uma vez que o programa LightTool possibilita a geração das curvas *isolux* diretamente na tela.

Para este estudo adota-se a classificação para um valor médio de referência de 600 lux (E_{alvo}). A definição dos intervalos é apresentada na Tabela 3. O primeiro intervalo corresponde a valores abaixo de 70% do valor da iluminância-alvo (E_{alvo}). O segundo corresponde a valores entre 70% da E_{alvo} até o valor da E_{alvo} . Já o terceiro compreende

valores entre E_{alvo} e um valor de tolerância (de 20% adicional à E_{alvo}). O quarto vai do valor de tolerância até um limite superior de 50% adicional à E_{alvo} ; e o quinto corresponde a valores superiores a este último. Como não existem normas estabelecidas, adotou-se como referência o valor de 120% da iluminância-alvo para delimitação do terceiro intervalo, em vez de 130%, conforme proposto por Kremer (2002), procurando delimitar, com mais proximidade ao valor da E_{alvo} , os valores compreendidos no intervalo considerado aceitável, de 600 a 720 lux.

O critério de uniformidade adotado é a razão entre a iluminância mínima (E_{min}) e a média ($E_{média}$) obtida para os pontos do ambiente, por ser mais facilmente calculada e produzida, já que a utilização dessa razão é mais difundida entre os projetistas (Equação 1).

$$U = (E_{min}/E_{média}) \quad \text{Eq. 1}$$

Análise do consumo energético

O consumo de energia (kWh) é calculado multiplicando-se a potência instalada do sistema de iluminação artificial (P_z) em cada zona de iluminação natural pelo tempo em que o sistema de iluminação artificial necessita ser ligado durante o ano (T_{art}).

O tempo de utilização do sistema de iluminação artificial (T_{art}) em cada zona é obtido mediante as médias dos valores de DA para cada zona resultantes das simulações no Daysim. Essas

médias indicam o tempo em que será necessário o uso de iluminação artificial ao longo do ano, em relação às horas ocupadas, 2.080 h (T_u). A potência instalada (kW) é verificada em cada zona e no sistema totalmente ligado, permitindo a análise do consumo de energia quando a luz natural é aproveitada pelo sistema de zoneamento. Para o cálculo, são contabilizadas apenas as potências das luminárias presentes em cada zona.

A Figura 5 apresenta o esquema das médias de cálculo de DA para cada zona (M_z). Na figura, $Mz1_{250}$ se refere à média dos valores de DA 250 para a zona 1; $Mz1_{500}$ se refere à média dos valores de DA 500 para a zona 1. Essa nomenclatura é adotada para as demais zonas, através das médias representadas pela sigla Mz . Para a zona 2, adotam-se $Mz2_{250}$ e $Mz2_{500}$; para a zona 3, adotam-se $Mz3_{250}$ e $Mz3_{500}$.

São consideradas duas situações de acionamento por zona. O sistema pode ser utilizado em meio circuito, o que caracteriza a **Situação 1**; ou em circuito inteiro, definindo a **Situação 2**.

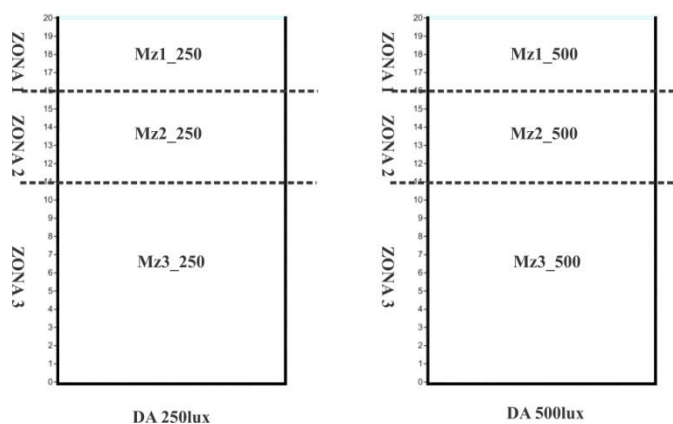
Situação 1: A subtração das médias de DA dos dois gráficos resulta no tempo em que o sistema de iluminação artificial pode ser utilizado em meio circuito ($MZ1_{250} - MZ1_{500}$), onde os níveis de iluminância variam entre 250 e 500 lux.

Situação 2: A subtração de 100% da média da DA 250 (100% - $MZ1_{250}$) resulta no tempo em que o sistema será totalmente ligado.

Tabela 3 - Definição dos intervalos de análise das zonas

Intervalo de iluminância	Zona
Valores abaixo de 70% E_{alvo}	0 a 420 lux
Valores entre 70% E_{alvo} e E_{alvo}	421 a 600 lux
Valores entre E_{alvo} e 120% E_{alvo}	601 a 720 lux
Valores entre 120% E_{alvo} e 150% E_{alvo}	721 a 900 lux
Valores acima de 150% E_{alvo}	Acima de 900 lux

Figura 5 - Esquema de obtenção das médias de DA - M01



Dessa forma, o tempo de utilização do sistema de iluminação artificial (T_{art}) para cada situação é definido pelas Equações 2 e 3. “ T_u ” equivale às horas de ocupação do espaço durante o ano (2.080 h).

$$Tart\ Zona\ (Situação\ 1) = (Mz_250\ lux - Mz_500) * T_u \quad Eq. 2$$

$$Tart\ Zona\ (Situação\ 2) = (100\% - Mz_250) * T_u \quad Eq. 3$$

Assim, os cálculos de consumo para cada zona são dados pela Equação 4, e P_z se refere à potência instalada em cada zona. Para a Situação 1 é utilizada metade da potência instalada em cada zona, visto que esta situação utiliza meio circuito; já para a Situação 2 é contabilizada a potência total de cada zona. Para cada zona são calculadas as duas situações. Para o cálculo do consumo do sistema totalmente ativo nas horas definidas de ocupação do espaço, multiplica-se a potência total do sistema pelas horas em que o sistema é ativo durante o ano.

$$Consumo\ da\ Zona = P_z * Tart\ Zona\ (Situação\ 2) + P_z/2 * Tart\ Zona\ (Situação\ 1) \quad Eq. 4$$

Resultados

A Figura 6 apresenta o zoneamento para o modelo. A configuração de uma abertura unilateral determina três zonas paralelas à abertura: a zona 1 (Z1) representa 20% da área total do ambiente; a zona 2 (Z2), 25% da área total; e a zona 3 (Z3), 55% da área total. O mesmo procedimento foi utilizado para o modelo M02. Para este modelo são definidas cinco zonas: Z1, 14% da área total do ambiente; Z2, 14%; Z3, 36%; Z1.1, 11%; e Z2.1, 25%. Para as análises de consumo de energia, as

zonas Z1 e Z1.1 são somadas, assim como as zonas Z2 e Z2.1.

Seleção dos melhores projetos: 1ª etapa

A Tabela 4 apresenta os resultados das melhores soluções entre os projetos propostos para o modelo M01. Os resultados obtidos permitiram identificar uma tendência na relação entre a uniformidade e o espaçamento entre as luminárias: quanto maior o espaçamento, maior a uniformidade. Essa tendência pode ser observada na Tabela 6, em que os projetos com maior uniformidade são os que tiveram modificações de afastamento entre as luminárias. Porém, observando-se as maiores áreas do ambiente compreendidas no intervalo aceitável de 600 a 720 lux, percebe-se que as maiores uniformidades não correspondem aos melhores níveis de iluminação.

A Tabela 4 mostra os projetos selecionados em cada luminária que obtiveram os maiores valores de área compreendida no intervalo considerado aceitável de 600 a 720 lux. Os valores selecionados são sempre muito próximos, com diferença máxima de 5%. Consta-se que a maioria dos projetos que atendem à análise de zonas (maior área no intervalo considerado aceitável) difere dos que possuem a maior uniformidade. Somente para três luminárias – BNI2x32W, DBL 2x32W E DIF 2x32 – a maior uniformidade coincide com a maior área naquele intervalo de iluminância (R05_2). Assim, neste momento, define-se que a escolha da melhor solução é baseada no atendimento à análise de zonas.

Figura 6 - Distribuição das zonas de DA para 250 lux e 500 lux e zoneamento da luz natural para o modelo M01

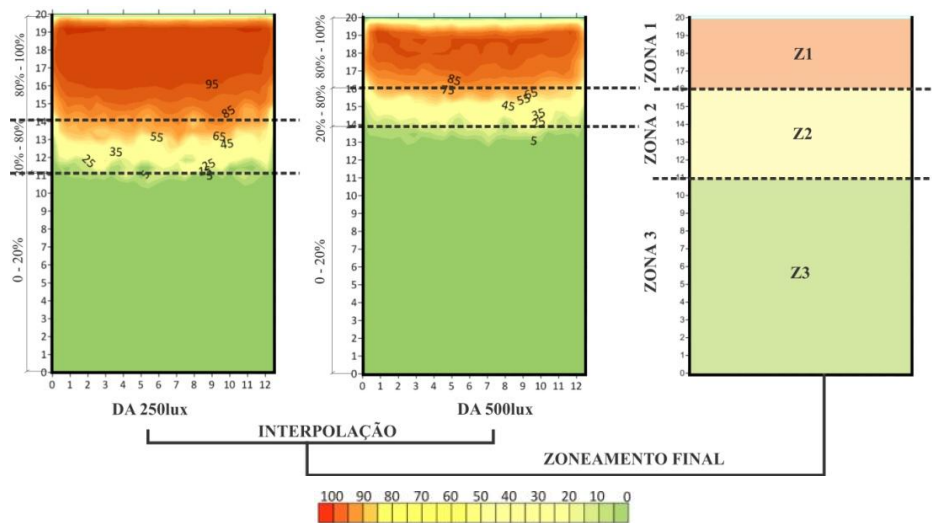


Tabela 4 - Projetos selecionados com as melhores soluções por parâmetro analisado - M01

Linha		Maior U	Maior área (600 a 720 lux)			Melhor distribuição
BNI	2x16w	R05_2	R01_90	R01_45	Original	R01_90
	2x32w	R05_2	R05_2			R05_2
	4x16w	R05_2	R01_45	R06		R01_45
	4x32w	R05_2	R2	R3		R2
DBL	2x16w	R05_2	R01_90	R2		R2
	2x32w	R05_2	R05_2			R05_2
	4x16w	R05_2	R01_45	R06		R01_45
	4x32w	R05	R2	R3		R2
OCT	2x16W	R05_2	R01_90	R01_45	R05_2	R01_90
	2x32W	R05	R2	R3		R3
	1x32W	R05_2	R2	R4		R2
DIF	2x16W	R05_2	R01_90	R01_45	R02	R01_90
	2x32W	R05_2	R05_2			R05_2

A Figura 7 mostra o procedimento adotado para a luminária BNI 4x16W. Sobre as soluções selecionadas na Tabela 6 foi realizada a análise conjunta de todos os parâmetros. A observação da tabela mostra que a reformulação R05_2 apresenta maior uniformidade, porém com uma distribuição menos homogênea do intervalo 600 a 720 lux e menor área – 45,7%. Já R01_45, apesar de menor uniformidade, distribui melhor a iluminação proveniente da luminária e possui 63,7% da área compreendida no intervalo analisado, assim como R06, que apresenta 61,6%. Nesta, há a presença de algumas zonas com iluminação excessiva. Sendo assim, o melhor projeto escolhido, que alia maior área na zona e melhor distribuição, é R01_45. Esse procedimento foi repetido para cada linha de luminária.

A Figura 8 ilustra os resultados finais para as melhores soluções, relacionando o parâmetro da uniformidade com o atendimento à análise de zonas, com as porcentagens de área compreendidas no intervalo 600 a 720 lux e acima de 600 lux. Para as linhas BNI e DBL verifica-se uma mesma tendência entre as luminárias com o mesmo número de lâmpadas e mesma potência. As luminárias 2X32W são as que apresentam a maior uniformidade e maior porcentagem de área sem zonas excessivas. No entanto, essa constatação não é válida para todas as soluções. As luminárias 2X16W e 4X16W variam nos valores de porcentagem de área, sem zonas excessivas, assim como nos valores de uniformidade entre uma linha e outra. A luminária DIF 2X32W também

apresenta alta uniformidade, porém com excesso de iluminação. A maior diferença entre as zonas analisadas ocorre nas luminárias 4X32W.

Importante ressaltar que a maioria dos projetos possui área menor que 68% do ambiente para o intervalo analisado, exceto para as luminárias BNI 2x32W E DBL 2x32W. A luminária da linha BNI 2X32W, na R05, apresenta maior área compreendida no intervalo 600 a 720 lux, 72,9%, em contraste com os 50% encontrados para a luminária OCT 2x32W. Apesar da indicação de melhores soluções, os projetos compostos pelas luminárias BNI4x32W, DBL 4x32W, OCT 2x32W e DIF 2x32W apresentam zonas excessivas.

É interessante mencionar a significativa diferença entre os projetos elaborados com luminárias distintas em uma mesma linha, assim como entre luminárias de diferentes linhas. A Figura 9 exemplifica essa condição, mostrando como há grande variação na distribuição da iluminação entre os sistemas para uma mesma linha de luminária. Esses resultados consideram a melhor distribuição no plano de trabalho, já que todas as soluções apresentadas nos gráficos foram as que obtiveram melhores resultados na primeira etapa das análises. A utilização de luminárias de duas lâmpadas de 32W possibilita maior área compreendida no intervalo de 600 a 729 lux, superior às demais luminárias da linha. Essas diferenças são ressaltadas nos gráficos anteriores, em que se pode perceber a presença de padrões distintos para os parâmetros analisados.

Figura 7 - Exemplo de seleção do melhor projeto para luminária BNI 4x16W - M01

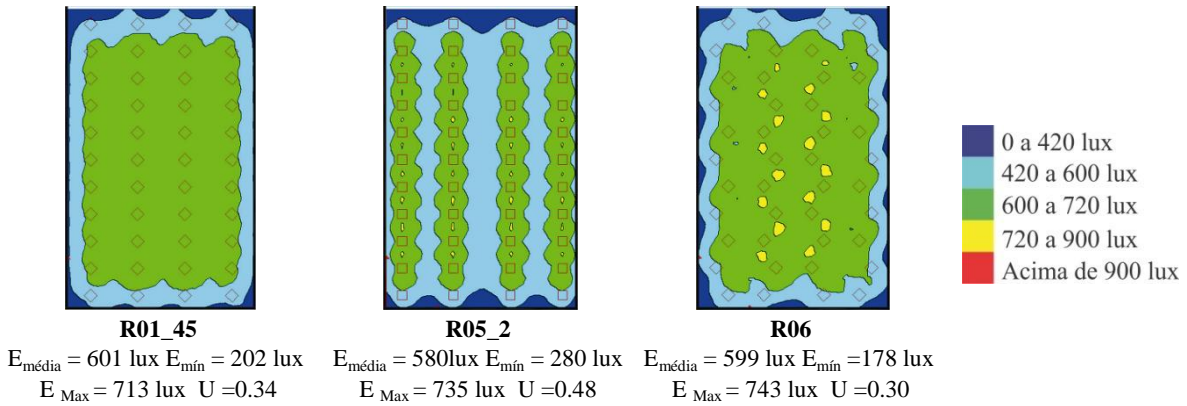


Figura 8 - Gráfico comparativo entre as melhores soluções para M01, para cada linha de luminária

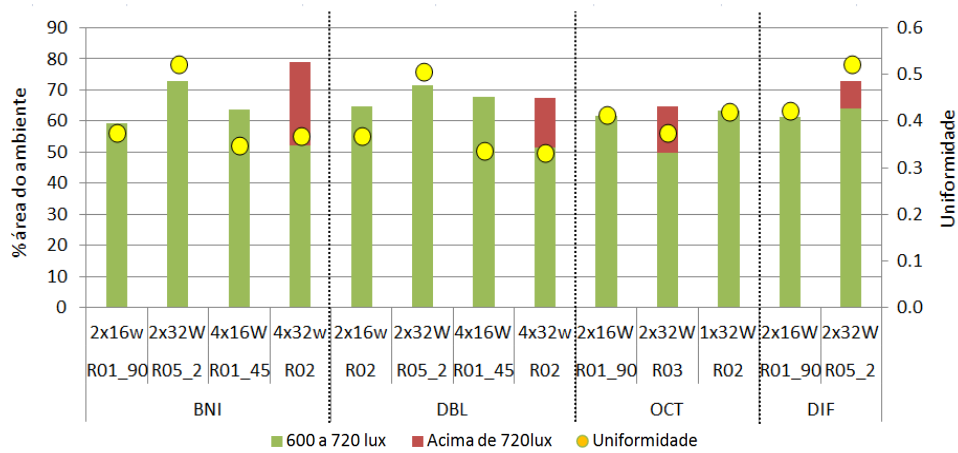
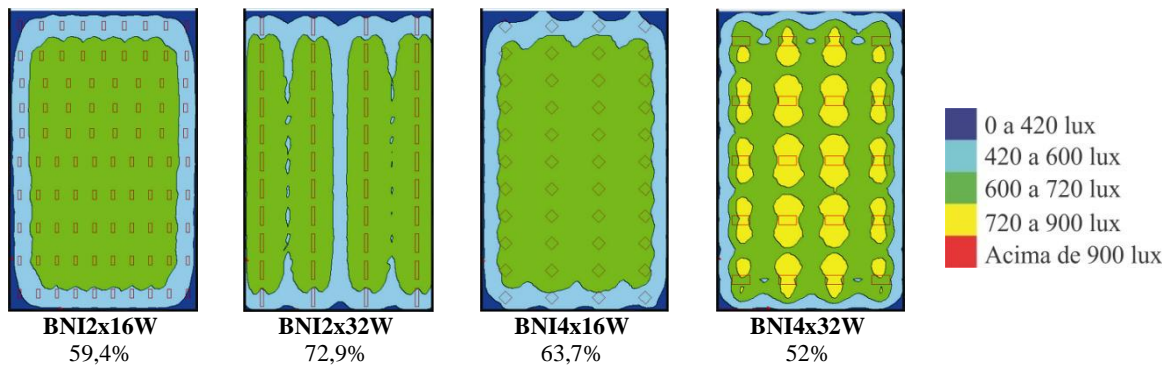


Figura 9 - Projetos selecionados com as melhores soluções e % de área compreendida no intervalo de 600 a 720 lux - M01



O procedimento apresentado anteriormente para M01 foi repetido nas análises do modelo M02. Para este, verifica-se que o comportamento é bem variável. Assim como para M01, as diferenças são visíveis para as luminárias dentro de uma mesma linha, e neste ambiente são mais discrepantes entre as diferentes linhas analisadas, conforme o gráfico da Figura 10.

Avaliação de consumo: 2ª etapa

A Figura 11 mostra as médias de DA para cada zona para o modelo M01, para cada valor de iluminância.

A Tabela 5 demonstra o procedimento do cálculo do tempo de utilização (T_u) do sistema de iluminação artificial para cada situação, em cada zona: Situação 1 – meio circuito ativo; Situação 2 – sistema totalmente ativo.

Figura 10 - Gráfico comparativo entre as melhores soluções para M02

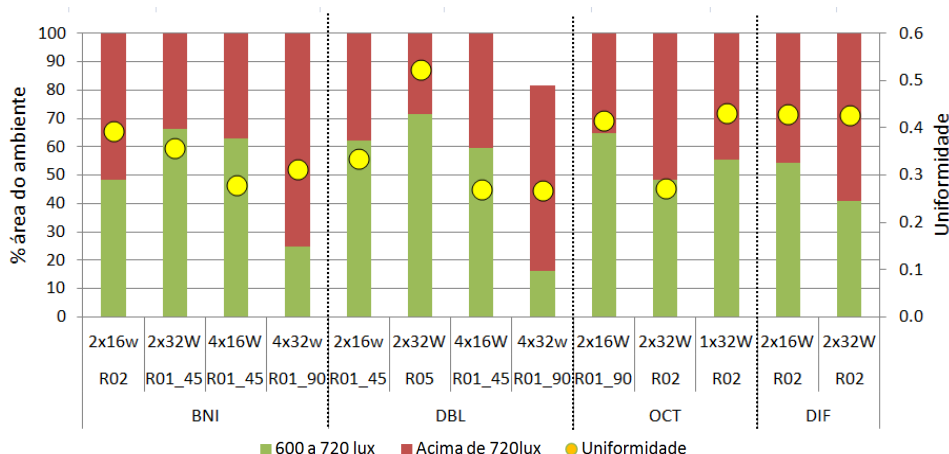


Figura 11 - Médias de DA para cada zona, para cada valor de iluminância - M01

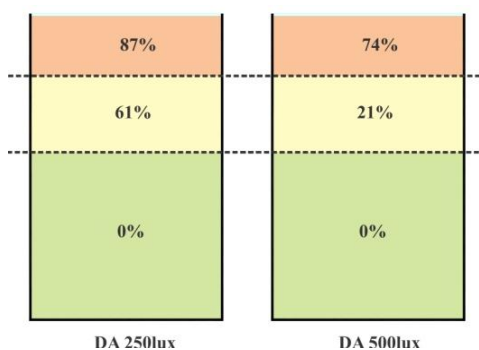


Tabela 5 - Procedimento de determinação do tempo de utilização - M01

	DA 500	DA 250	Situação 1 (250<DA< 500)	Situação 2(DA< 250)
Z1	74%	87%	13% (87%-74%)	13% (100%-87%)
Z2	21%	61%	40% (61%-21%)	39% (100%-61%)
Z3	0 %	1%*	-	100%

Assim, os cálculos de consumo para cada zona ocorrem de acordo com as Equações 5, 6 e 7:

$$\text{Consumo da zona 1} = P_{z1} * (13\% * T_u) + P_{z1/2} * (13\% * T_u) \quad \text{Eq. 5}$$

$$\text{Consumo da zona 2} = P_{z2} * (39\% * T_u) + P_{z2/2} * (40\% * T_u) \quad \text{Eq. 6}$$

$$\text{Consumo da zona 3} = P_{z3} * (100\% * T_u) \quad \text{Eq. 7}$$

Para o modelo M02, as médias dos valores de DA para cada zona são exibidas na Figura 12.

O procedimento de cálculo do tempo de utilização de cada zona é demonstrado na Tabela 6. Para a zona 1, o sistema estará ligado totalmente 19% do tempo e, em 17% do tempo poderá ser utilizado meio circuito, ao longo do ano. Para a zona 2, em 51% tempo poderá ser utilizado meio circuito e em 37% do tempo o sistema deverá ser totalmente ligado. Para a zona 3, em 87% do tempo será

necessário o uso do sistema total ativo, e em 13%, meio circuito. A mesma análise ocorre para as demais zonas.

Para o cálculo do consumo final, são somados os consumos de Pz1 e Pz1.1, assim como de Pz2 e Pz2.1. Assim, para o modelo M02, os cálculos de consumo são dados pelas equações abaixo (Equações 8, 9 e 10):

$$\text{Consumo da Zona 1} = P_{z1} * (19\% * T_u) + P_{z1.1} * (24\% * T_u) + P_{z1/2} * (17\% * T_u) + P_{z1.1/2} * (15\% * T_u) \quad \text{Eq. 8}$$

$$\text{Consumo da Zona 2} = P_{z2} * (37\% * T_u) + P_{z2.1} * (51\% * T_u) + P_{z2/2} * (51\% * T_u) + P_{z2.1/2} * (30\% * T_u) \quad \text{Eq. 9}$$

$$\text{Consumo da Zona 3} = P_{z3} * (87\% * T_u) + P_{z3/2} * (13\% * T_u) \quad \text{Eq. 10}$$

Aplicando-se as equações descritas acima para cada linha de luminária são obtidos os gráficos de estimativa de consumo de energia. A Figura 13 apresenta os resultados de consumo final para as melhores soluções obtidas para cada luminária para o modelo M01, assim como as reduções de consumo para cada reformulação (%).

Constata-se que os sistemas que mais consomem energia possuem luminárias difusoras (DIF). Ressalta-se que essas luminárias não são as que apresentam maior área compreendida no intervalo 600 a 720 lux. A maior área está presente em BNI 2x32W (72,9%). Para esta luminária, os consumos são de 3.957 kWh para o sistema de zoneamento e de 5.857 kWh (redução de 32%) sem o sistema, valores parecidos com os encontrados para as

luminárias BNI 4x16W, DBL 2x32W e DBL4x16W.

Os consumos variam pouco dentro de cada linha. A variação máxima entre as quatro soluções apresentadas de cada linha de luminária atinge 5% para a linha BNI, 8% para DBL, 10% para OCT e 16% para DIF. As análises da primeira etapa mostram que os modelos com luminárias de duas lâmpadas de 32 W contêm mais porcentagem de área do ambiente contida no intervalo considerado (Figura 8). O menor consumo é verificado na luminária OCT 1x32W – 3.123 kWh no sistema de acionamento por zonas de iluminação e 4.792 kWh sem o sistema. Importante ressaltar que esta luminária não possui controle de ofuscamento, o que pode influenciar nas questões relacionadas ao ofuscamento, assunto não abordado neste trabalho.

Figura 12 - Médias dos valores de autonomia da luz natural (DA) para cada zona - M02

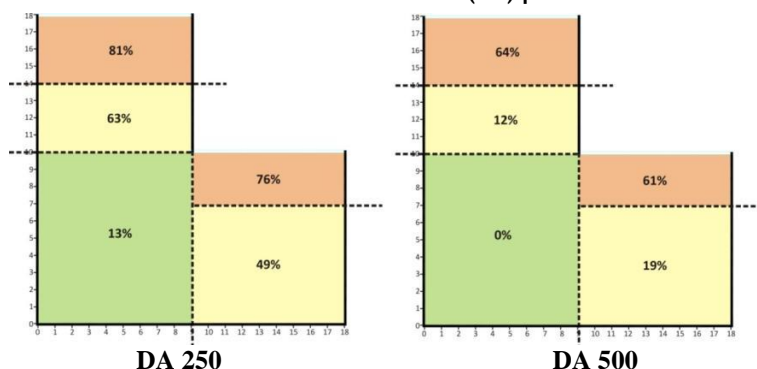
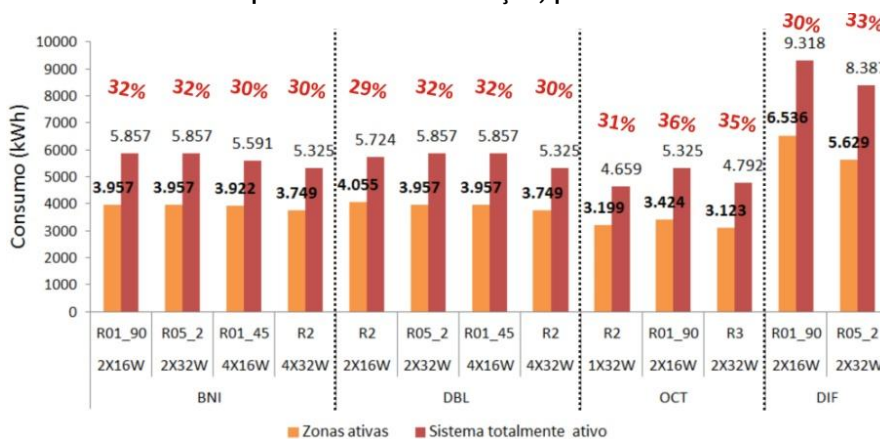


Tabela 6 - Procedimento de determinação do tempo de utilização - M02

Zona	DA 500	DA 250	Situação 1 (250<DA< 500)	Situação 2 (DA< 250)
Z1	64%	81%	17% (81%-64%)	19% (100%-81%)
Z1.1	61%	76%	15% (76%-61%)	24% (100%-76%)
Z2	12%	63%	51% (63%-12%)	37% (100%-63%)
Z2.1	19%	49%	30% (49%-19%)	51% (100%-49%)
Z3	0%	13%	13% (13%-0%)	87% (100%-13%)

Figura 13 - Estimativa de consumo para cada melhor solução, por circuito de acionamento



Os dados de consumo para os sistemas selecionados para o modelo M02 são representados na Figura 14. Os valores de consumo são semelhantes para as luminárias dentro de cada linha analisada, exceto para a linha OCT. A média de redução para os consumos comparando-se os consumos de todas as luminárias foi de 46%, sendo que as reduções variam entre 44% e 48%, superiores ao M01.

As reduções de consumo em M02 foram superiores em relação a M01, o que pode ser explicado pela profundidade do ambiente. Como M01 possui grande profundidade e apenas uma janela na fachada norte, os níveis alcançados pela iluminação natural são menores no fundo do ambiente. Já em M02, a presença de duas aberturas nesta fachada proporciona maiores níveis de iluminação no interior do ambiente, aumentando a área das zonas 1 e 2, e reduzindo a área da zona 3, responsável pelos maiores consumos de energia, já que necessita o uso da iluminação artificial por mais tempo ao longo do ano, resultando em maiores reduções nos consumos de energia para esse modelo.

Conclusões

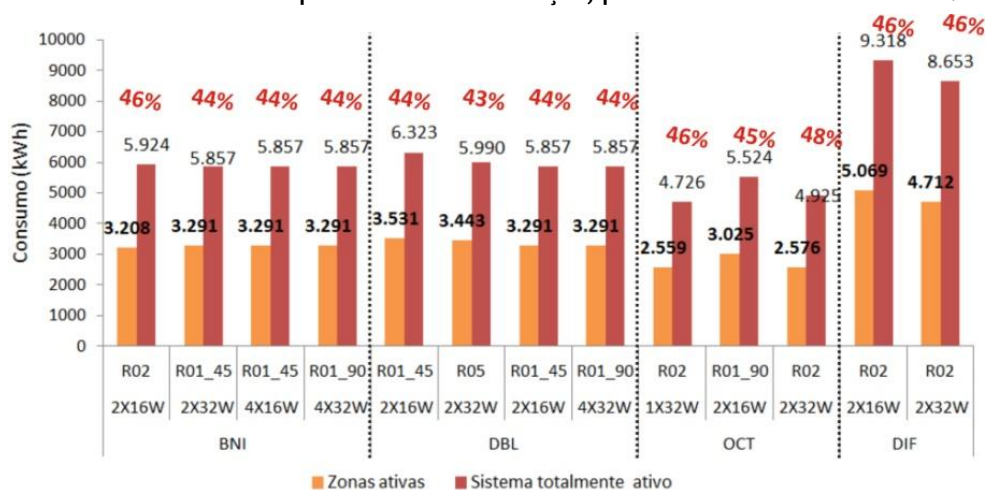
Este trabalho apresenta uma análise de diferentes projetos luminotécnicos em ambientes genéricos considerando uma disponibilidade de iluminação natural. Foram realizadas 111 simulações de iluminação artificial para M01 (retangular) e 58 para M02 (em forma de “L”), totalizando 169 simulações. Essas simulações compreenderam reformulações realizadas sobre o projeto original, buscando verificar a influência das modificações

propostas quanto à distribuição da iluminação no espaço e ao consumo de energia.

Como resultado, os projetos considerados como melhores soluções na primeira etapa das análises diferem dos projetos concebidos pelos critérios caracterizados no projeto original, a partir do Método dos Lúmens. Os parâmetros baseados em valores numéricos utilizados para a avaliação – uniformidade e análise de zonas –, comumente utilizados pelos projetistas para a estimativa dos projetos de iluminação, implicaram dificuldades nas avaliações: os valores numéricos encontrados não permitiram uma distinção entre os melhores projetos. A definição do melhor projeto se deu pela observação dos mapas de distribuição luminosa, uma vez que se constatou que os ambientes que possuem maiores valores de uniformidade muitas vezes não corresponderam àqueles que possuem maiores percentagens de área do ambiente compreendida na zona de 600 a 720 lux, considerada como a zona aceitável de iluminação.

Quanto à uniformidade, constatou-se que os projetos originais não garantem níveis adequados de uniformidade da iluminação. Apenas dois projetos, selecionados entre as melhores soluções para o modelo M01, apresentam níveis acima de 0,5, e para M02, apenas para uma luminária. Ressalta-se que estes foram os que tiveram modificações de afastamento entre as luminárias, sendo para todos os casos analisados os projetos com maiores uniformidades aqueles que apresentaram maior iluminância mínima. Observou-se que vários projetos, que resultaram em maiores áreas compreendidas nas zonas, possuíam menor uniformidade, e vice-versa. Ou seja, estes dois parâmetros não estão necessariamente correlacionados.

Figura 14 - Estimativa de consumo para cada melhor solução, por circuito de acionamento - M02



Verificou-se também que há pouca variação no consumo de energia quando se utilizam luminárias de uma mesma linha e também entre as linhas de luminárias com aletas. Apesar de a redução de consumo variar pouco, a utilização de luminárias com duas lâmpadas necessitou de um número maior de luminárias, de forma que houve melhor distribuição dos níveis de iluminância no ambiente.

Para as reformulações nos ambientes que consideraram a distribuição das luminárias de acordo com as zonas de iluminação natural, R02, apesar de estes não sofrerem muita influência na distribuição da iluminação, verificou-se que, em relação ao consumo de energia, as soluções que consideraram as zonas de iluminação natural para a distribuição das luminárias resultaram em menores consumos, com reduções de até 20% em relação ao projeto original. Assim, são necessários mais estudos que analisem a distribuição das luminárias de acordo com esse critério.

Embora a utilização de outros tipos de controle, como sensores fotoelétricos e *dimmers*, possa gerar maiores economias de energia, é importante ressaltar que o estudo limita-se a utilizar apenas um tipo de controle para a análise do consumo de energia, pois o foco do trabalho está na análise de diferentes configurações de sistemas de iluminação artificial, e não na análise da disponibilidade de iluminação natural. Da mesma forma, reconhece-se que as configurações e dimensionamento dos brises, e as dimensões dos ambientes e das aberturas influenciam na admissão da iluminação natural no interior dos ambientes.

A partir dos resultados obtidos e das análises efetuadas, inferiu-se que a escolha das luminárias é decisiva quanto à qualidade e à eficiência do projeto de iluminação, sendo essencial o conhecimento de suas características por parte do projetista envolvido no processo.

Referências

ALBUQUERQUE, A. T. **Uma Metodologia Para Otimização do Projeto de Iluminação Artificial Aplicando Recozimento** – Manaus. Manaus, 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2007.

BOYCE, P. The Measure of Quality: just how do we define good lighting? **CIBSE Journal**, dec. 2012.

CLARO, A. **Modelo Vetorial Esférico Para Radiosidade Aplicado à Iluminação Natural**. Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

CASSOL, F. *et al.* Multi-Objective Optimization as a New Approach to Illumination Design of Interior Spaces. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 331-338, 2011.

CUTTLE, C. Towards the Third Stage of the Lighting Profession. **Lighting Res. Technology**, v. 42, n. 1, p. 73-93, 2010.

DIDONÉ, E. **A Influência da Luz Natural na Avaliação da Eficiência Energética de Edifícios Contemporâneos de Escritórios em Florianópolis/SC**. Florianópolis, 2009. 174 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

KREMER, A. **A Influência de Elementos de Obstrução Solar no Nível e na Distribuição Interna de Iluminação Natural em Escolas**. Florianópolis, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MOORE, F. **Environment Control Systems: heating cooling lighting**. New York: McGraw-Hill, 1993.

REINHART, C.; MORRISON, M. The Lights Witch Wizard: reliable daylight simulations for initial design investigation. **Building Simulation**, v. 3, p. 1093-1100, 2003.

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.

ROBBINS, C. L. **Daylighting, Design and Analysis**. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1986.

ROISIN, B. *et al.* Lighting Energy Savings in Offices Using Different Control Systems and Their Real Consumption. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 4, p. 514-523, 2008.

SABRY, H. M. K.; FAGGAL, A. A. E. Integration of Electric of Electric Lighting system in a Daylit: building. In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 22., Beirut, 2005.

SHIKDER, S.; MOURSHED, M.; PRICE, A. Luminaire Position Optimisation Using Radiance Based Simulation: a test case of a senior living room. In: COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING, Nottingham, 2010. **Proceedings...** Nottingham, 2010.

SOUZA, M. B. **Potencialidade de Aproveitamento da Luz Natural Através da Utilização de Sistemas Automáticos de Controle Para Economia de Energia Elétrica.** Florianópolis, 2003. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

TOLEDO, B. G. **Integração de Iluminação Natural e Artificial : métodos e guia prático para projeto luminotécnico.** 2008. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2008.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao MEC, pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudos, às contribuições do Prof. Wilson Teixeira e à empresa LightGroup.

Leticia Niero Moraes

Laboratório de Conforto Ambiental | Universidade Federal de Santa Catarina | Campus Universitário | Caixa Postal 476 | Florianópolis - SC - Brasil | CEP 88040-900 | Tel.: (48) 3721-9393 Ramal 35 | E-mail: letinierom@gmail.com

Anderson Claro

Departamento de Arquitetura, Centro Tecnológico | Universidade Federal de Santa Catarina | Campus Universitário, Trindade | Florianópolis - SC - Brasil | CEP 88010-970 | Tel.: (48) 331-9393 | E-mail: ander@arq.ufsc.br

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br