



METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL E ARTIFICIAL INTEGRADOS.

M B de Souza^{1,2}; M T Leite^{1,3}; L Lino^{1,3} & F O R Pereira^{1,2,3}

Universidade Federal de Santa Catarina

¹Departamento de Arquitetura e Urbanismo - LABCON

²Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

³Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

88.040-900 - Florianópolis/SC - Brasil

e-mail: ctimbs@eps.ufsc.br, ecv3mdl@ecv.ufsc.br, lino@intergate.com.br, feco@arq.ufsc.br

RESUMO Este trabalho tem por finalidade apresentar uma metodologia de avaliação das diversas estratégias de controle da iluminação artificial quando se busca o melhor aproveitamento da luz natural. Para cinco estratégias de controle são apresentadas equações que fornecerão valores numéricos para estimativa do potencial de economia de cada uma delas.

ABSTRACT This paper aims to present a methodology for evaluation of the several control strategies of the artificial lighting when the best use of the natural light is looked for. Four step strategies and a dimming (automatic systems) are presented, with their respective equations that supply numeric values that will assess economy potential of each one of them.

1 Introdução

Quando se pretende reduzir o consumo de energia elétrica gasta em iluminação deve-se pensar, não somente na substituição do sistema existente por outro de maior eficiência, mas também de que maneira este pode ser controlado com o intuito de tirar melhor proveito da luz natural disponível que além de proporcionar uma redução no consumo é considerada pelas pessoas como uma fonte de luz estimulante.

Este artigo apresenta uma metodologia de avaliação para diversas estratégias de controle de sistemas integrados de iluminação (artificial/natural). O objetivo é identificar qual estratégia proporcionará maior redução no gasto de energia consumida em

iluminação. São três os tipos de estratégias de controle aqui analisadas: interruptor liga/desliga, interruptor de passo e dimerização contínua. Para todas as estratégias de controle são considerados sistemas automatizados.

2 Metodologia

2.1 Definição das zonas de iluminação

Na busca de um projeto de iluminação de alto desempenho, o ambiente a ser iluminado deverá ser dividido em zonas de iluminação. As zonas de iluminação são caracterizadas por áreas que apresentam uma distribuição de iluminâncias com características similares. O tamanho da zona dependerá da configuração da abertura, das condições de céu, e do período (mês, dia e hora).

Para a definição das zonas, utilizando-se de códigos computacionais, o projetista de iluminação deverá simular o ambiente projetado para as três condições de céu (claro, parcial e encoberto) nos dias representativos de cada período analisado, tais como: verão, primavera, inverno e outono. Após definidos o dia representativo de cada período, recomenda-se que a estimativa da distribuição de iluminâncias seja realizada para três horários: um ao meio dia (12h00min) e os outros, três horas antes (09h00min) e três horas depois do meio dia (15h00min). Estes horários são recomendados por não ser uma boa idéia estabelecer as zonas para os piores horários de desempenho, ou seja, o início e o término do período de expediente.

Deve-se evitar a entrada da radiação solar direta dentro da sala, por que os pontos que forem atingidos por ela terão altos níveis de iluminâncias, que além de desnecessários, irão distorcer os parâmetros de análise da distribuição, tais como: a iluminância máxima, mínima e média do ambiente. Sempre que um controle destes se fizer necessário, dispositivos deverão atuar sobre a abertura de iluminação, redistribuindo de maneira uniforme a radiação solar direta. Segundo O'Connor [1997], dentro de uma zona de iluminação, a razão entre a iluminância máxima e a iluminância mínima deverá ser sempre menor que 3:1 ($E_{m\acute{a}x}/E_{m\acute{i}n} \leq 3$), isto garantirá uma relação de contraste razoável dentro da zona. Esta recomendação poderá variar de acordo com a atividade visual que será desenvolvida na zona, nunca sendo superior a 9:1 ($E_{m\acute{a}x}/E_{m\acute{i}n} \leq 9$), Robbins [1986]. A Fig. 1 mostra uma sala com duas zonas paralelas a abertura de iluminação.

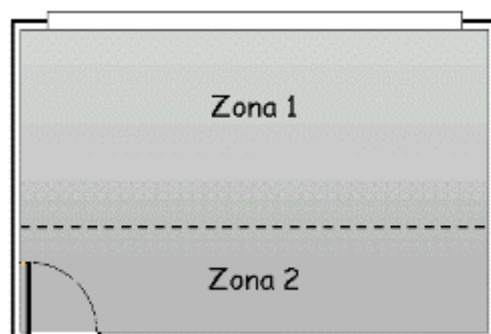


Fig. 1 Zonas de Iluminação.

Um maior número de zonas em uma sala possibilitará um melhor controle da iluminação e conseqüentemente uma maior oportunidade de economia de energia. Porém, os custos iniciais podem aumentar com o aumento do número de zonas. Quando uma sala é dividida em um pequeno número de zonas, a redução no desempenho do sistema integrado de iluminação é compensado pela redução nos custos iniciais do sistema. Como em qualquer outro sistema de engenharia, uma combinação de desempenho, custos iniciais, custos de operação e manutenção devem ser avaliados a fim de obter a estratégia de controle ótima para a edificação e para o seu proprietário.

Deve-se ter bem claro que está é uma sugestão de como definir as zonas, podendo-se utilizar outros critérios em sua definição. Um estudo de diferentes agrupamentos de zonas poderá ser compensador, pois é provável que alguns agrupamentos sejam mais eficientes que outros.

2.2 Determinação do ponto de controle da zona

Uma vez definida as zonas da sala, o próximo passo é estabelecer um ponto de controle da zona que será utilizado para estabelecer a estratégia de controle. Escolher o ponto correto talvez seja mais crítico que estabelecer as zonas de iluminação. Normalmente, nem o ponto de mais alta iluminância e nem o de mais baixa devem ser utilizados para caracterizar a zona de iluminação. Quando é adotado o ponto de mais alta iluminância, corre-se o risco de que a zona seja sub-iluminada, caso este ponto apresente iluminância mais alta que a iluminância de projeto. Reciprocamente, quando se utiliza o ponto de mais baixa iluminância a zona será superiluminada na maior parte do seu período de utilização. Então, recomenda-se que o ponto de controle esteja em um local que apresente uma iluminância que fique entre o valor máximo e o mínimo. Um ponto que apresente um valor de iluminância próximo a iluminância média da zona é uma boa sugestão. Algumas vezes o próprio fabricante do sistema de controle fornece especificações sobre onde colocar o foto-sensor do sistema na zona de iluminação.

2.3 Estratégias de controle da iluminação artificial

O tipo mais comum de controle do sistema de iluminação artificial é o controle manual de dois passos (liga/desliga), que poderá controlar luminárias individuais, conjunto de luminárias ou até mesmo todas as luminárias do espaço. Porém, quando se pretende realizar a integração entre os sistemas de iluminação artificial e natural, é preciso ir mais além, utilizando-se sistemas automáticos de múltiplos passos ou sistemas dimerizáveis, que serão projetados com base em algum critério de necessidade de iluminação (iluminância média, ocupação da sala, etc.), pois só eles garantirão que a iluminação artificial será desligada quando a luz natural fornecer iluminância suficiente para a realização da atividade visual desenvolvida no ambiente. A escolha da estratégia de controle apropriada é mais importante que a definição do tamanho e localização das zonas, pois a redução do consumo de energia elétrica gasta em iluminação em uma determinada zona dependerá desta estratégia.

2.3.1 Interruptor automático liga/desliga

Um interruptor automático liga/desliga, também chamado de interruptor de dois passos, é utilizado nas áreas onde a iluminância da luz natural esperada, está acima da iluminância de projeto na maioria do tempo ou onde grandes saltos de iluminância

interior na zona não aborrecem as pessoas. As luzes são apagadas (passo 1) quando a iluminância interior da luz natural é igual ou maior que a iluminância de projeto. As lâmpadas são ligadas (passo 2) quando a luz natural interior é menor que a iluminância de projeto da zona. O primeiro passo (luzes desligadas) para o interruptor liga/desliga é também o primeiro passo para todas as estratégias de passo.

2.3.2 Controlador automático de três passos

O controlador de três passos é um interruptor utilizado em luminárias que possuem duas lâmpadas. No primeiro passo as lâmpadas estão desligadas, no segundo apenas uma lâmpada da luminária é acessa e ela passa a fornecer 50% do fluxo luminoso total e no terceiro e último passo, as duas lâmpadas são ligadas e a luminária passa a funcionar com seu fluxo máximo.

2.3.3 Controlador automático de quatro passos

O controlador automático de quatro passos é utilizado em luminárias que possuem 3 lâmpadas. No primeiro passo todas as lâmpadas da luminária estão desligadas, no segundo apenas 1 lâmpada é ligada e a luminária fornece 33% do seu fluxo luminoso máximo, no terceiro duas lâmpadas são ligadas fazendo com que a luminária passe a fornecer 66% do fluxo luminoso máximo e no quarto passo todas as lâmpadas são ligadas e a luminária fornece o seu fluxo luminoso máximo.

2.3.4 Controlador automático de cinco passos

O controlador automático de cinco passos é utilizado em luminárias com 4 lâmpadas. No primeiro passo todas as lâmpadas estão desligadas, no segundo, terceiro, quarto e quinto passos, uma, duas, três e quatro lâmpadas são ligadas respectivamente, fazendo com que a luminária forneça 25%, 50%, 75% e 100% do fluxo luminoso máximo.

2.3.5 Controlador automático dimerizável

Existem dois tipos de controladores automáticos dimerizáveis. O primeiro é um controlador de diminuição contínua do fluxo luminoso com a existência de um limite mínimo de fluxo, o que faz com que o sistema de iluminação artificial sempre proporcione uma iluminância mínima (E_{min}). O segundo funciona da mesma maneira que o primeiro, com um adicional, a opção de desligar todo o sistema, fazendo com que não exista nenhuma iluminância gerada pela luz artificial quando esta não é necessária.

Para estabelecer o tipo de controlador ideal para uma zona, o projetista tem que analisar as características de desempenho de cada técnica de controle e determinar a melhor para a zona. Em alguns casos, a mesma estratégia de controle pode ser usada em todas as zonas da sala; em outros, uma estratégia diferente para cada zona poderá ser a solução que traga os melhores resultados.

2.4 Percentual de Aproveitamento da Luz Natural (PALN)

O percentual de aproveitamento da luz natural (PALN) é a variável utilizada para avaliar e comparar o desempenho das diversas opções de controle, através dela também é possível estimar a quantidade de energia economizada com a utilização da luz natural.

Determinar o PALN é estabelecer dentro do horário de utilização do ambiente o período no qual a luz natural poderá substituir ou complementar a luz artificial. O percentual de aproveitamento da luz natural é então dado pela Equação 1:

$$\text{PALN} = \text{PALN}_s + \text{PALN}_c \quad (1)$$

Onde:

PALN - Percentual de aproveitamento da luz natural;

PALN_s - Percentual de aproveitamento da luz natural por substituição da iluminação elétrica;

PALN_c - Percentual de aproveitamento da luz natural por complementação da iluminação elétrica.

Para que a luz natural possa substituir a o sistema de iluminação artificial, a iluminância proporcionada por ela (E_{LN}) deverá ser maior ou igual a iluminância de projeto (E_P). A complementação ocorre quando a iluminância da luz natural for menor que a iluminância de projeto e maior que a iluminância mínima ($E_{\text{mín}}$) que o sistema artificial poderá fornecer.

A análise do PALN para cada zona de controle deve ser feita para as três condições de céu (céu claro, céu parcial e céu encoberto). Para que a comparação entre as várias estratégias de controle de passo e as de diminuição contínua possa ser feita torna-se necessário a atribuição de pesos aos PALN, correspondentes a probabilidade de ocorrência de cada tipo de céu. O valor do percentual de aproveitamento da luz natural ponderado para as três condições de céu é dado pela Equação 2:

$$\text{PALN}_p = [(\text{PALN}_{cc} \cdot \rho_{cc}) + (\text{PALN}_{cp} \cdot \rho_{cp}) + (\text{PALN}_{ce} \cdot \rho_{ce})] \quad (2)$$

Onde:

PALN_p - Percentual de aproveitamento da luz natural ponderado;

PALN_{cc} - Percentual de aproveitamento da luz natural com céu claro;

PALN_{cp} - Percentual de aproveitamento da luz natural com céu parcial;

PALN_{ce} - Percentual de aproveitamento da luz natural com céu encoberto;

ρ_{cc} - Probabilidade de ocorrência de céu claro;

ρ_{cp} - Probabilidade de ocorrência de céu parcial;

ρ_{ce} - Probabilidade de ocorrência de céu encoberto.

Determinados os PALN_p de cada mês, calcula-se o $\text{PALN}_{\text{anual}}$ através da Equação 3.

$$PALN_{\text{anual}} = \frac{\sum_{n=1}^{12} PALN_{(n)}}{12} \quad (3)$$

Após calcular o percentual de aproveitamento da luz natural anual ponderado de cada zona determina-se o da sala através da Equação 4, que leva em consideração a área de cada zona.

$$PALN_{\text{SALA}} = \frac{[(PALN_{\text{ANUAL-1}} \cdot A_1) + (PALN_{\text{ANUAL-2}} \cdot A_2) + \dots + (PALN_{\text{ANUAL-n}} \cdot A_n)]}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (4)$$

Onde: $PALN_{\text{ANUAL-1}}$, $PALN_{\text{ANUAL-2}}$ e $PALN_{\text{ANUAL-n}}$

São os percentuais de aproveitamento da luz natural anual ponderado de cada zona;

A_1 , A_2 e A_n - São as áreas de cada zona que somadas representam a área total da sala.

2.4.1 Cálculo do PALN para um sistema de controle automático liga/desliga

O percentual de aproveitamento da luz natural por substituição para cada condição de céu e para cada dia analisado é a relação que existe entre o número de horas em que a iluminância da luz natural é maior que a iluminância de projeto pelo número total de horas de utilização do ambiente (n).

$$PALN_B = \frac{\sum_{n=0}^n (E_{LN} \geq E_P)}{n} \quad (5)$$

2.4.2 Cálculo do PALN para um sistema de controle automático de três passos

Ao contrário da estratégia de controle automático liga/desliga, onde o aproveitamento da luz natural se dá única e exclusivamente por substituição, aqui o aproveitamento da luz natural, hora se dá por substituição, quando a iluminância da luz natural for maior que a iluminância de projeto ($E_{LN} \geq E_P$) e hora por complementação, quando a iluminância da luz natural for menor que a iluminância de projeto, mas possui valores acima da iluminância mínima fornecida pelo sistema ($E_P > E_{LN} \geq E_{\text{mín}}$; $E_{\text{mín}} = 50\%$ da E_P). Para calcular o $PALN_S$ utiliza-se a Equação 5 e o $PALN_C$ a Equação 6.

$$PALN_C = \frac{\sum_{n=0}^n (0,50 \cdot E_P \leq E_{LN} < E_P)}{n} \cdot 0,50 \quad (6)$$

2.4.3 Cálculo do PALN para um sistema de controle automático de quatro passos

Da mesma forma que na estratégia de três passos a diferença está no cálculo do $PALN_C$ que para este caso é determinado através da Equação 7.

$$PALN_c = \frac{\sum_c (0,66 \cdot E_p \leq E_{L_n} < E_p)}{n} \cdot 0,66 + \frac{\sum_c (0,33 \cdot E_p \leq E_{L_n} < 0,66 \cdot E_p)}{n} \cdot 0,33 \quad (7)$$

2.4.4 Cálculo do PALN para um sistema de controle automático de cinco passos

Para a estratégia de controle automático de cinco passos o PALN_C é dado pela Equação 8.

$$PALN_c = \frac{\sum_c (0,75 \cdot E_p \leq E_{L_n} < E_p)}{n} \cdot 0,75 + \frac{\sum_c (0,5 \cdot E_p \leq E_{L_n} < 0,75 \cdot E_p)}{n} \cdot 0,50 + \frac{\sum_c (0,25 \cdot E_p \leq E_{L_n} < 0,5 \cdot E_p)}{n} \cdot 0,25 \quad (8)$$

2.4.5 Cálculo do PALN para um sistema de controle automático dimerizável

Para sistemas dimerizáveis o PALN_C dependerá da iluminância da luz natural e de suas características, tais como: potências máxima e mínima e dos níveis de iluminância máximo e mínimo. Admitindo-se um sistema dimerizável de variação linear determina-se o PALN_C através da Equação 9.

$$PALN_c = \frac{\sum_c \left\{ 1 - \frac{P_{min}}{P_{max}} - \left[\frac{P_{max} - P_{min}}{E_{max} - E_{min}} \right] \cdot \frac{E_p - E_{L_n} - E_{min}}{P_{max}} \right\}}{n} \quad (9)$$

A Tab. 1 mostra um exemplo de determinação do PALN_S, PALN_C e PALN para uma estratégia de controle automático de três passos. Através dela pode-se verificar a economia proporcionada pelo aproveitamento da luz natural. Neste exemplo a luz natural proporciona uma economia de 45,3% da energia gasta em iluminação, 27,3% por substituição e 18% por complementação.

Tab. 1 Cálculo do PALN para estratégia de controle automático de três passos.

Zona: 2 Dia: 15 de Junho						
		Tipo de céu: Encoberto				
		E _{LN}	E _{LN} ≥ E _P	E _{LN} ≥ (0,50.E _P)	E _{LA}	E _{TOT}
08h00min	500	235	0	0	500	735
09h00min	500	370	0	4,5	250	620
10h00min	500	469	0	4,5	250	719
11h00min	500	527	9,1	0	0	527
12h00min	500	540	9,1	0	0	540
13h00min	500	506	9,1	0	0	506
14h00min	500	428	0	4,5	250	678
15h00min	500	311	0	4,5	250	561
16h00min	500	164	0	0	500	664
17h00min	500	0	0	0	500	500

18h00min	500	0	0	0	500	500
PALN_s = 27,3% PALN_c = 18% PALN = 45,3%						

3 Conclusões

Devido ao grande potencial de economia de energia elétrica gasta em iluminação artificial, a avaliação do sistema de iluminação natural jamais poderá ser negligenciada quando se pretende obter um ambiente de qualidade e energeticamente eficiente. As equações apresentadas neste trabalho permitem a criação de algoritmos que a partir de dados de disponibilidade de luz natural, fornecerão informações sobre a eficiência energética das diversas estratégias de controle da luz artificial.

A integração dos sistemas de iluminação (natural e artificial) deve fazer parte das etapas iniciais do projeto prevendo sempre estratégias de controle automatizadas, pois só elas poderão garantir o real potencial de economia de energia que a luz natural proporciona. A escolha da estratégia a ser adotada dependerá da economia de energia que ela proporcionará e dos resultados que se pretende alcançar, devendo-se escolher sempre a tecnologia de iluminação e os controles de melhor custo efetivo dentro do orçamento do projeto.

4 Referências Bibliográficas

Robbins, Claude L. (1986). Daylighting: design and analysis. Van Nostrand Reinhold, New York.

O'Connor, J. Lee, E. Rubinstein, F. e Selkowitz, S. (1997). Tips for Daylighting with Windows. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL 39945.