



COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE CONTROLE EM RESPOSTA A LUZ NATURAL EM AMBIENTES COM ILUMINAÇÃO EM PAREDES OPOSTAS

Marcos Barros de Souza (1); Fernando O. R. Pereira (2); Anderson Claro (3)

(1) Fundação Universidade Federal do Rio Grande - marcosbs@vetorial.net

(2) Universidade Federal de Santa Catarina - feco@arq.ufsc.br

(3) Universidade Federal de Santa Catarina - ander@arq.ufsc.br

RESUMO

O presente trabalho é continuidade de um estudo que foi realizado para 3 sistemas de iluminação natural (unilateral; oposta e com janelas em paredes adjacentes). Para sistemas com iluminação unilateral os resultados foram publicados no *claCS'04/ENTAC'04 – I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável / 10^o Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. Neste artigo o estudo é realizado em um modelo com iluminação oposta de largura fixa de 6m, profundidade que varia de 4 a 10m e com a razão área da janela/área da parede de 0,25, 0,33 e 0,50. O modelo é dividido em zonas de iluminação paralelas as aberturas de iluminação natural, onde se comparam três estratégias de controle da iluminação artificial (liga/desliga, 3 passos e dimerizável) em resposta a luz natural. Após dividir o modelo em zonas de iluminação determina-se o Percentual de Aproveitamento da Luz Natural (PALN) para as três estratégias de controle. Os resultados mostram que na troca de uma estratégia de controle liga/desliga para uma de 3 passos e de uma de 3 passos para uma dimerizável existe um acréscimo no valor do PALN. Este acréscimo é função do tamanho da janela, da iluminância de projeto e da profundidade do modelo podendo chegar a 20%.

ABSTRACT

In this article the study is carried through using a model with opposing lighting, 6m width fixed, 4 to 10m depth, with the ratio area of the window/wall area 0,25, 0,33 and 0,50. The model is divided in lighting zones parallel to the openings for natural lighting, comparing three strategies for artificial lighting control (on/off, 3 steps and dimming) with the natural light. After dividing the model in lighting zones, it was found the percentage of use of natural light (PALN) for the three strategies of control. The results reported that the exchange of the on/off control strategy to one of 3 steps and the exchange of the 3 steps strategy for a dimming either, there is an addition in the value of the PALN. This addition is function of the size of the window, the illuminance of design and the depth of the model reaching 20%.

1. INTRODUÇÃO

A crise energética pela qual a sociedade passa hoje, obriga a todos a utilização racional da energia. Os sistemas de iluminação responsáveis por grande parte da energia consumida na edificação tornam-se um dos principais alvos na busca da eficiência energética, e a luz natural por ser gratuita é um dos fatores que mais contribuem para se obter um sistema energeticamente eficiente. Entretanto, a iluminação natural só proporcionará economia se o sistema artificial for desligado total ou parcialmente. O avanço tecnológico nos controles para a iluminação artificial têm proporcionado um

aumento no número de projetos que buscam a integração do sistema artificial com o sistema natural de iluminação.

O presente estudo mostra o ganho percentual na economia de energia elétrica gasta em iluminação através da troca de estratégia de controle do sistema de iluminação artificial em ambientes que fazem aproveitamento da luz natural. Para avaliar e comparar o desempenho das diversas opções de controle utiliza-se a variável PALN (percentual de aproveitamento da luz natural). O PALN também permite estimar a quantidade de energia economizada com o aproveitamento da luz natural, que pode ser por substituição ou complementação da iluminação elétrica,(SOUZA, 2003).

2. METODOLOGIA

Na busca de uma edificação energeticamente eficiente a luz natural deve ser sempre levada em consideração em virtude do seu grande potencial de redução do consumo de energia gasta em iluminação artificial. Para se obter todas as vantagens de todos os benefícios oferecidos pela luz natural é necessário adquirir profundo conhecimento de seu comportamento. Com este objetivo em mente, é importante analisar todas as possibilidades de iluminação natural disponíveis para os arquitetos. O primeiro passo é alcançar uma boa aproximação dos efeitos dos componentes de iluminação natural que estão sendo utilizados no projeto arquitetônico (BAKER et al, 1993).

Monitorar a iluminação natural numa edificação existente, pode não ser uma tarefa fácil; variações, horárias, sazonais e atmosféricas representam variações significativas na disponibilidade da luz natural (FONTOYNONT,1999). Sensores fotométricos podem apresentar dificuldades na sua localização e próprio funcionamento, uma vez que necessitam de instrumentação específica para a coleta e aquisição de dados. Desta forma, a simulação numérica através de programas computacionais apresenta-se como a escolha mais adequada, neste estudo, para a predição do comportamento dos ambientes quanto à admissão da luz natural do exterior.

2.1 A ferramenta de simulação

O programa utilizado para a simulação computacional foi o LuzSolar, que usa um sistema global de referência geográfica denominado Modelo Vetorial Esférico (CLARO, 1998). O céu, por sua vez (a abóbada celeste), é caracterizado por um conjunto de luminâncias associadas a cada direção de visualização, inclusive uma posição especificada como a posição do Sol em dada circunstância. Os valores e a distribuição das luminâncias para as diferentes condições de céu – claro, encoberto e parcial - seguem os modelos matemáticos padronizados recomendados pela IES (REA, 1999).

A simulação da propagação da luz natural no ambiente interno é feita através do algoritmo da Radiosidade. Maiores detalhes podem ser obtidos em (CLARO, 1998) e (CLARO & PEREIRA, 2001).

2.2 O modelo de ambiente

O presente trabalho está limitado ao estudo de modelos retangulares de largura fixa (6 m) e profundidade variável (4;5;6;7;8;9 e 10 m) com janelas colocadas em paredes opostas, com peitoril fixo de 1 m e altura fixa de 1,5 m. O vidro das janelas possui transmitância da luz visível de 0,86.

Os modelos nos quais procura-se compreender o comportamento da luz natural a iluminação é feita através de janelas colocadas na parede frontal e na parede oposta. A janela é expressa como uma fração da largura da parede, apresentando altura fixa de 1,5 metros. São três os tipos de janelas:

☐ **Janela única:** apenas uma janela é colocada na parede, com a largura equivalente a metade do vão da parede e centrada no mesmo (*Window to Wall Ratio* - razão da área da janela pela área da parede - $WWR = 0,25$);

☐ **Janela Dupla:** duas janelas são colocadas na parede, cada uma com 1/3 do vão da parede, tendo espaçamento igual entre elas e a parede ($WWR = 0,33$);

❑ **Janela Total:** a janela tem largura equivalente ao vão da parede onde se insere ($WWR=0,50$).

Foram adotadas refletâncias de 20% para o piso, 50% para as paredes e 70% para o teto. Estas refletâncias são típicas de ambientes de trabalho (STEFFY, 1990).

2.3 As condições de disponibilidade de luz natural

As simulações dos modelos foram realizadas para a cidade de Florianópolis-SC (longitude $48^{\circ}34'$ - oeste; latitude $27^{\circ}35'$ - sul), com a fachada principal (fachada que contém a janela) orientada para o norte (azimute 0°), leste (azimute 90°), sul (azimute 180°) e oeste (azimute 270°).

A disponibilidade de luz natural foi determinada para 3 condições de céu (claro, parcial e encoberto) e para 7 datas específicas que definem um conjunto de dias típicos representativos do percurso anual do sol, mês a mês (22 Dez; 28 Jan; 28 Fev; 21 Mar; 15 Abr; 15 Maio e 22 Jun). Com estas 7 datas tem-se a caracterização da distribuição de luminâncias do céu ao longo do ano.

2.4 Plano de exame

O plano de exame é uma superfície horizontal situada a 75 cm do piso do modelo e ocupando toda a extensão de área entre as paredes. O plano de exame é parcelado em unidades de área quadrada de 33 cm x 33cm (para os modelos com profundidade de 4, 5, 6 e 7 m) ou 50 cm x 50 cm (para os modelos com profundidade de 8, 9 e 10 m), caracterizados pelas coordenadas do seu ponto central, onde será calculada a iluminância da parcela.

2.5 Definição das zonas de iluminação

Visando a otimização do sistema de iluminação artificial, o ambiente a ser iluminado deve ser dividido em zonas de iluminação, área que se caracterizam por apresentarem uma distribuição de iluminâncias com características similares. Na determinação das zonas de iluminação deve-se procurar não os pontos que possuem os níveis de iluminância de projeto ou variações ao longo do ano e sim, por padrões de distribuição de iluminâncias que possam ser agrupados. Dentro de uma zona de iluminação, a razão entre a iluminância máxima e a iluminância mínima deverá ser sempre menor que 3:1 ($E_{máx}/E_{mín} \leq 3$), garantindo uma relação de contraste razoável (ROBBINS, 1986).

O procedimento de determinação das zonas de iluminação é realizado da seguinte maneira:

- A cada hora, das 8h às 18h, é determinada a iluminância de cada uma das parcelas do plano de exame;
- Determinadas as iluminâncias de cada parcela do plano de exame, identifica-se a iluminância mínima ($E_{mín}$). Se a iluminância mínima for inferior a 50 lux, assume-se 50 lux como sendo a iluminância mínima;
- A iluminância mínima será o ponto de partida para a definição da faixa de cada zona de iluminação. As zonas de iluminação de cada hora simulada terão os seguintes limites: ($E_{mín}$); ($3xE_{mín}$); ($9xE_{mín}$); ($27xE_{mín}$); ($81xE_{mín}$) e assim sucessivamente até que seja atingido a iluminância máxima do ambiente (FIGURA 1);

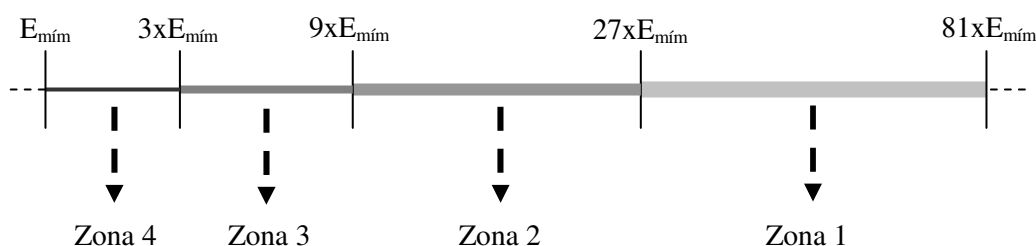


FIGURA 1 - Limites das zonas de iluminação.

- Definido o número de zonas da hora simulada e os limites das mesmas, o próximo passo é atribuir a cada parcela do plano de exame a indicação a qual zona ela pertence;

- Identificado a qual zona de iluminação cada parcela pertence em cada uma das horas simuladas, é atribuído à parcela a zona na qual ela apareceu com maior frequência. Neste momento tem-se o mapa de distribuição de zonas que garantirá uma razão de iluminâncias, dentro da zona, menor ou igual a 3 ($E_{\text{máx}}/E_{\text{mín}} \leq 3$) na maioria das horas.

O mapa de zonas de iluminação é gerado para as 3 condições de céu (claro, parcial e encoberto). Com os três mapas então se decide pelo número e distribuição das zonas de iluminação para o modelo simulado.

2.6 Definição do ponto de controle da zona de iluminação

A correta definição do ponto de controle de cada zona de iluminação, que será utilizado para estabelecer a estratégia de controle, talvez seja mais crítica que estabelecer as próprias zonas de iluminação (ROBBINS, 1986). Foi escolhido como ponto de controle a iluminância média da zona de iluminação.

Verificou-se que sempre que a iluminância média da zona de iluminação era maior que 3000 lux, existiam uma ou mais parcelas no plano de exame que apresentavam iluminâncias muito altas, evidenciando a presença da radiação solar direta. A fim de evitar estes altos níveis de iluminância, que além de desnecessários, distorcem o cálculo da iluminância média, o modelo foi novamente simulado com um vidro leitoso com transmitância da luz visível de 40% o que representaria o emprego de uma simples cortina como elemento de controle da radiação direta sobre a janela. Embora a ação usual seja a de empregar um elemento de sombreamento (quebra-sol), este produz uma modificação significativa na distribuição espacial da luz admitida (dependendo de sua geometria) e uma conseqüente intensa redução da luz admitida, tanto do sol como da abóbada celeste. A hipótese adotada, não muito menos usual que o quebra-sol, controla a característica direcional da luz direta do sol sem, contudo reduzir a quantidade de luz admitida, que é controlada apenas através da parcela transmitida.

2.7 Estratégias de controle

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 fundamentalmente desta estratégia. As estratégias utilizadas foram as seguintes:

Interruptor Liga/Desliga automático: As lâmpadas são desligadas (passo 1) quando a iluminância média na zona de iluminação proporcionada pela luz natural for igual ou maior que a iluminância de projeto. As lâmpadas são ligadas (passo 2) quando a iluminância média da luz natural interior for menor que a iluminância de projeto;

Interruptor automático de 3 passos: O controlador de 3 passos é um interruptor utilizado em luminárias que possuem duas lâmpadas. No primeiro passo as duas lâmpadas estão desligadas, no segundo apenas uma lâmpada da luminária é ligada 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.

Dimerização contínua automática: Este é um controlador de diminuição contínua do fluxo luminoso em função da quantidade de luz natural disponível. O sistema é desligado sempre que a iluminância média da luz natural na zona for maior que a iluminância de projeto, fornecendo um fluxo luminoso mínimo (10% da iluminância de projeto com 40% de consumo da potência do sistema).

Utiliza-se a mesma estratégia de controle em todas as zonas de um mesmo ambiente.

2.8 Percentual de aproveitamento da luz natural (PALN)

O percentual de aproveitamento da luz natural (PALN) é o parâmetro utilizado para avaliar e comparar o desempenho das diversas opções de controle. Determiná-lo é estabelecer, dentro do

horário de utilização do ambiente, o período no qual a luz natural poderá substituir ou complementar a luz artificial.

A análise do PALN para cada zona de controle é feita para três condições de céu (céu claro, parcial e encoberto). Para que a comparação entre as 2 estratégias de controle possa ser feita, são atribuídos pesos aos PALN correspondentes a probabilidade de ocorrência de cada tipo de céu (SOUZA, 2003).

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para cada zona de iluminação dos modelos simulados e os respectivos PALN's alcançados com a utilização da luz natural como complemento e/ou substituição da iluminação artificial.

3.1 Zonas de iluminação

Para iluminação oposta o ambiente foi dividido em 3 zonas de iluminação. Embora existam pequenas diferenças no tamanho das zonas para este modelo em função da orientação da fachada principal e do tipo de janela, um valor médio para o tamanho das zonas de iluminação é mostrado na **FIGURA 2**:

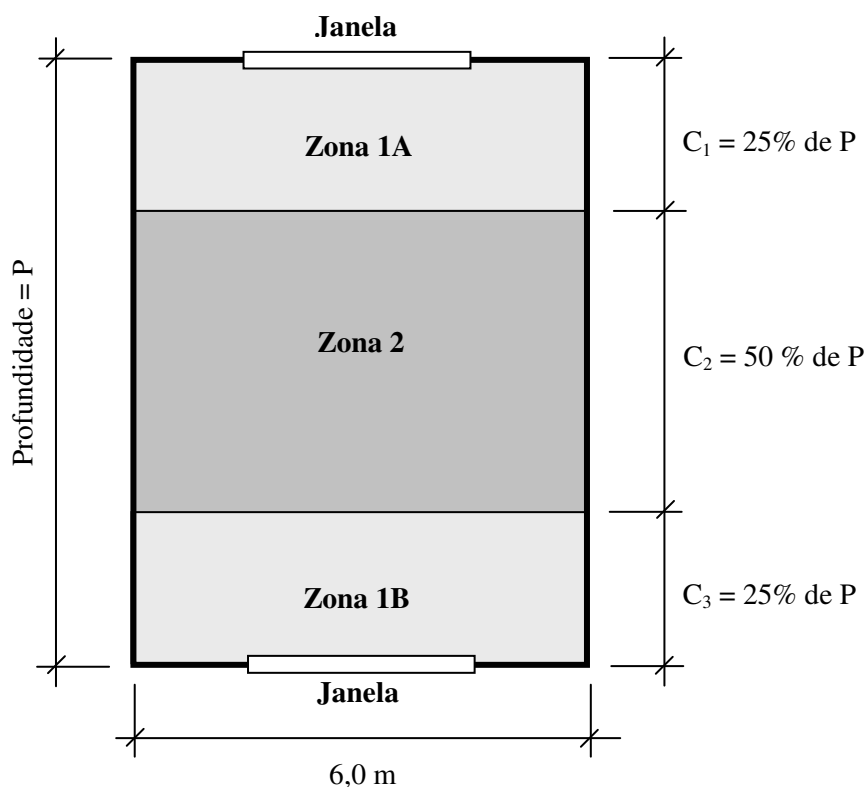


FIGURA 2 – Configuração de zonas de iluminação para ambientes com iluminação oposta.

Para este tipo de iluminação a maior zona é a 2. Ela apresenta os menores níveis de iluminância proporcionado pela luz natural e seu tamanho é o dobro do tamanho das zonas 1A e 1B. As zonas 1A e 1B são assim chamadas por apresentarem características semelhantes na distribuição da luz natural.

3.2 Percentual de aproveitamento da luz natural

Determinadas as zonas de iluminação, a próxima etapa foi a obtenção dos PALNs dos modelos variando-se a estratégia de controle da iluminação artificial (Liga/Desliga; 3 passos e Dimerizável), os níveis de iluminamento (300 Lux; 500 Lux e 1000 Lux) e a orientação da fachada principal (Norte; Leste; Sul e Oeste). Após analisar os resultados obtidos pode-se chegar as seguintes constatações:

- ❑ Só será possível reduzir o consumo de energia elétrica gasta em iluminação através do aproveitamento da luz natural na zona 2, para iluminâncias de projeto de 1000 Lux, se for adotada uma estratégia de controle automático de 3 passos e o modelo possuir uma janela total ou dimerizável para todos os tipos de janelas. Nestas condições o PALN varia de 10% a 29%;
- ❑ Para iluminância de projeto de 500 Lux o PALN varia de 10% a 29% para uma estratégia de controle automático liga/desliga chegando a percentuais de 30% a 49% quando é adotada uma estratégia dimerizável na zona 2;
- ❑ Quando a iluminância de projeto é de 300 Lux o PALN fica entre 30% e 49% na zona 2 para as estratégias de controle automático liga/desliga e 3 passos. Se a estratégia adotada for um controle dimerizável, o PALN varia de 30% a 69%;
- ❑ Nas zonas 1A e 1B o PALN varia de 10% a 29% para iluminância de projeto de 1000 Lux e estratégia de controle liga/desliga. Se a estratégia for de 3 passos ou dimerizável o PALN passa para valores de 30% a 49%;
- ❑ Para iluminâncias de projeto de 500 Lux o PALN varia de 50% a 69% para as três estratégias de controle nas zonas 1A e 1B;
- ❑ Quando a iluminância de projeto é de 300 Lux o PALN possui valores iguais ou superior 70% nas zonas 1A e 1B.

A **TABELA 1** apresenta os PALNs nas zonas de iluminação dos ambientes com iluminação unilateral para três iluminâncias de projeto (300 Lux, 500 Lux e 1000 Lux), três estratégias de controle automático (liga/desliga, 3 passos e dimerizável) e três tipos de janelas (única, dupla e total).

TABELA 1 - PALN das zonas de iluminação dos modelos com iluminação oposta na cidade de Florianópolis.

Zonas de Iluminação	PALN [%]	Iluminância de Projeto [Lux]								
		300			500			1000		
		Estratégias de Controle			Estratégias de Controle			Estratégias de Controle		
		L/D	3 passos	DIM	L/D	3 passos	DIM	L/D	3 passos	DIM
Zona 1A	10 - 29							U - D	U	
	30 - 49				U	U		T	D - T	U - D
	50 - 69	U	U		D - T	D	U - D			T
	≥ 70	D - T	D - T	U - D - T		T	T			
Zona 1B	10 - 29							U - D	U	
	30 - 49				U	U		T	D - T	U - D
	50 - 69	U	U		D - T	D	U - D			T
	≥ 70	D - T	D - T	U - D - T		T	T			
Zona 2	10 - 29	U			U - D - T	U			T	U - D - T
	30 - 49	D - T	U - D - T	U		D - T	U - D - T			
	50 - 69			D - T						
	≥ 70									

Obs: **U** - Modelos com janela única (WWR = 0,25); **D** - Modelos com janela dupla (WWR = 0,33); **T** - Modelos com janela total (WWR = 0,50)

As células em branco indicam que nenhum dos três tipos de janelas é capaz de reduzir o consumo de energia elétrica gasta em iluminação artificial através do aproveitamento da luz natural.

3.3 Estratégias de controle automático em ambientes com iluminação unilateral

A FIGURA 3 mostra a influência das estratégias de controle no valor do PALN. Observa-se, no gráfico, que a mudança de estratégia de controle proporciona uma diferença no valor do PALN que se mantém praticamente constante para as diversas profundidades.

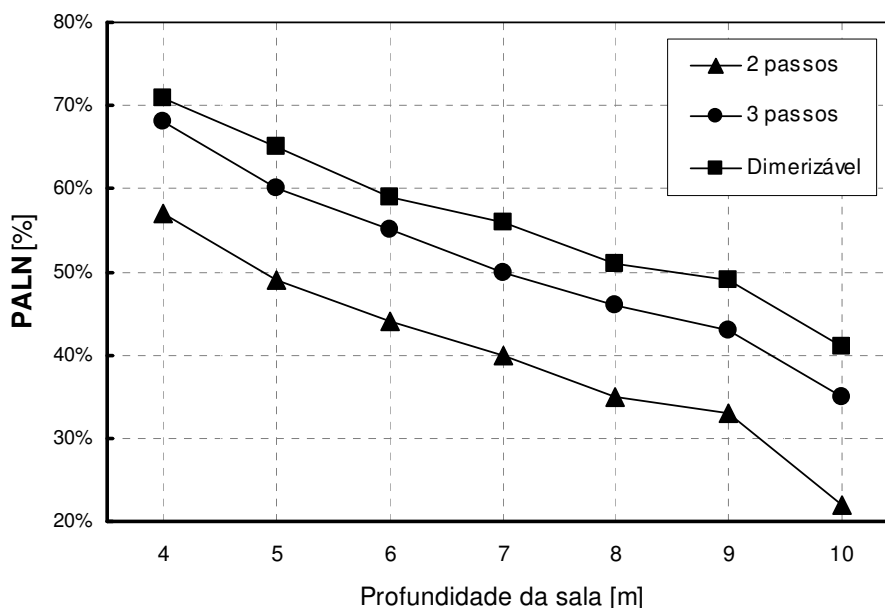


FIGURA 2 – PALN (Janela dupla; Iluminância de projeto 500 lux; Norte; Florianópolis)

A proporção de economia de energia elétrica gasta em iluminação proporcionada por uma estratégia de controle em relação a outra estratégia é apresentada na TABELA 2.

TABELA 2 – Proporção de economia de energia das estratégias de controle automático em ambientes com iluminação oposta na cidade de Florianópolis

TIPO DE JANELA	Iluminância de Projeto [Lux]	Proporção de economia [%]		
		L/D → 3 passos	3 passos → Dim	L/D → Dim
Única (WWR = 0,25) x 2	300	82	93	77
	500	69	87	61
	1000	64	70	44
Dupla (WWR = 0,33) x 2	300	88	95	83
	500	77	91	70
	1000	63	79	49
Total (WWR = 0,50) x 2	300	91	96	88
	500	83	94	78
	1000	65	85	56

A **TABELA 3** apresenta quanto aumentaria o PALN se a estratégia de controle da iluminação artificial fosse trocada. Em média, uma troca de controle liga/desliga para um controle de 3 passos aumenta o PALN em 10,4%; de 3 passos para dimerizável em 5,5% e da liga/desliga para a dimerizável existe um acréscimo de 15,9%.

TABELA 3 – Acréscimo do PALN através da mudança de estratégia de controle automático da iluminação artificial em ambientes com iluminação oposta na cidade de Florianópolis

TIPO DE JANELA	Iluminância de Projeto [Lux]	Acréscimo do PALN para mudança de estratégia de controle [%]		
		L/D → 3 passos	3 passos → Dim	L/D → Dim
Única (WWR = 0,25) x 2	300	11	4	15
	500	13	6	19
	1000	9	9	18
Dupla (WWR = 0,33) x 2	300	8	4	12
	500	12	5	17
	1000	12	7	19
Total (WWR = 0,50) x 2	300	6	3	9
	500	10	4	14
	1000	13	7	20
Médias		10,4	5,5	15,9

4. CONCLUSÕES

Os sistemas automáticos de controle de passo e os dimerizáveis em resposta à luz natural apresentam-se como uma opção a ser utilizada na integração dos sistemas de iluminação natural e artificial. Estes sistemas são capazes de reduzir o tempo de utilização do sistema artificial e conseqüentemente diminuem o consumo de energia gasta em iluminação.

O potencial de economia de energia elétrica gasta em iluminação artificial proporcionado pela luz natural em cada zona e no ambiente está relacionado com a iluminância de projeto, com a estratégia de controle do sistema artificial, com o tipo de iluminação natural, tipo de janela e com a profundidade do ambiente.

Um outro fator que também interfere no potencial de economia da luz natural é o tipo de iluminação (unilateral, oposta e adjacente). No estudo dos modelos com iluminação natural através de janelas colocadas em paredes opostas pode-se verificar que este é o que apresenta os maiores valores de PALN. Por exemplo: uma abertura de iluminação janela única oposta ($2 \times \text{WWR} = 0,25$) proporcionará um PALN 39% maior do que a mesma abertura de iluminação colocada em uma parede ($\text{WWR} = 0,50$).

O modelo com janela oposta ($\text{WWR} = 0,25$), iluminância de projeto de 1000 Lux, profundidade de 10 m e estratégia de controle liga/desliga é o que apresenta o menor PALN, sendo este de 6%. O maior PALN é 87% e ocorre quando o modelo tem janela total ($\text{WWR} = 0,50$), iluminância de projeto de 300 Lux, profundidade de 4 m e estratégia de controle dimerizável.

Na troca da estratégia de controle liga/desliga para uma de 3 passos, de uma de 3 passos para uma dimerizável existe um acréscimo no valor do PALN. Este acréscimo é função do tipo de janela, iluminância de projeto e da profundidade do modelo. Realizando uma média geral pode-se dizer que:

As equações 1, 2 e 3 mostram o ganho em pontos percentuais que é obtido através da mudança de estratégia de controle da iluminação artificial.

$$PALN_{3PASSOS} = PALN_{LIGA/DESLIGA} + 10,4\% \quad [\text{Eq. 01}]$$

$$PALN_{DIM} = PALN_{3PASSOS} + 5,5\% \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$PALN_{DIM} = PALN_{LIGA/DESLIGA} + 15,9\% \quad [\text{Eq. 03}]$$

Pode-se verificar nesta pesquisa que a luz natural tem uma grande potencialidade de redução da energia elétrica gasta em iluminação artificial. Embora a estratégia de controle dimerizável apresente os melhores resultados, somente uma análise custo/benefício poderá mostrar o sistema mais indicado para cada situação.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAKER, N.; FANCHIOTTI, A & STEEMERS, K. **Daylighting in Architecture**: A European Reference Book. Commission of the European Communities, James & James Ltd., 1993.

CLARO, A. – *Modelo Vetorial Esférico para Radiação Aplicado à Iluminação Natural*. Tese de Doutorado Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. UFSC. Florianópolis, 1998.

CLARO, A.; PEREIRA F. O. R. - *LuzSolar: Prototype for the Study of Daylight in Architecture and Urbanism*. In: **Anais do PLEA 2001 - 18th Conference on Passive and Low Energy Architecture**, Florianópolis – BRAZIL, 7-9/11/2001, Vol. 2, pp. 941-945.

FONTOYNONT, Marc (Editor): **Daylight Performance of Buildings**. James & James, London/UK, 1999.

ROBBINS, C. L. (1986). **Daylighting: design and analysis**. Van Nostrand Reinhold Company. New York, United States of America, 1986.

REA, Mark (Editor): **IES Lighting Handbook**, 9th Edition, IESNA, New York/USA, 1999.

SOUZA, Marcos Barros de. **Potencialidade de aproveitamento da luz natural através da utilização de sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica**. Florianópolis, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, UFSC, 2003

STEFFY, G. R. **Architectural lighting design**. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1990.