

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS

Enedir Ghisi (1); John A. Tinker (2)

(1) Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Campus Trindade, 88040-900, Florianópolis-SC, e-mail: enedir@labeee.ufsc.br

(2) Leeds University, School of Civil Engineering, Leeds, LS2 9JT, email: j.a.tinker@leeds.ac.uk

RESUMO

A integração efetiva da luz natural com o sistema de iluminação artificial ocorre apenas quando este pode ser ligado ou desligado em função dos níveis de iluminação natural que atingem a superfície de trabalho dos ambientes. Esse trabalho apresenta uma metodologia para avaliar o potencial de economia de energia em iluminação devido à integração efetiva de iluminação natural e artificial em edificações. Considera-se o uso de novas tecnologias, como fibras ópticas, que são avaliadas como um meio de transportar luz natural para o fundo dos ambientes onde o suprimento de luz natural é baixo. Esta abordagem contribuiria para a redução do consumo de energia em iluminação e da poluição ambiental associada ao consumo de energia em edificações.

ABSTRACT

The effective integration of the artificial lighting system and daylight occurs only when the artificial lighting system can be switched on or off as a function of daylighting levels reaching the working surface of spaces. Hence, this work presents a methodology to assess the potential for energy savings on lighting due to the effective integration of daylight with artificial lighting in buildings. A part of the work considers new technologies such as fibre optics, which are evaluated as a means of transporting daylight to the rear side of rooms where the supply of daylight is low. Such an approach would contribute to the reduction in energy consumed by lighting and at the same time to the environmental pollution associated with buildings.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de iluminação são responsáveis pelo consumo de grandes quantidades de energia em todo o mundo. Felizmente, avanços no mercado de equipamentos de iluminação têm contribuído para minimizar este problema; mas este é um processo lento e a maior parte dos edifícios – não somente no Brasil – ainda estão equipados com sistemas de iluminação energeticamente ineficientes.

O consumo de iluminação varia muito de país para país, fato devido não apenas a condições climáticas, mas também a hábitos culturais. A Tabela 1 apresenta usos finais em iluminação em edifícios comerciais para alguns países, e indica que países desenvolvidos tendem a apresentar usos finais mais elevados. No Brasil, o uso final em iluminação em edificações comerciais com instalações de ar condicionado é de aproximadamente 24%, mas pode atingir até 70% em edificações comerciais desprovidas de equipamentos de ar condicionado (PROCEL, 1993).

GELLER (1990) estudou os setores comercial e público em São Paulo e observou que o uso final em iluminação foi de 44%, um percentual bem superior ao apresentado na tabela anterior e mais condizente com a realidade nacional.

Como mostrado, a iluminação pode ser responsável por grande parte do consumo de energia em edificações, indicando que estratégias para reduzir tal consumo deveriam visar o sistema de iluminação.

Tabela 1. Uso final em iluminação em edifícios comerciais para diferentes países.

País	Uso final em iluminação (%)	Fonte
China	15	MIN et al. (1995)
Koréia	20	KOREAN NATIONAL TEAM (1996)
Brasil	24	PROCEL (1993)
México	30	BANDALA (1995)
E.U.A	39	EIA (1994)
Holanda	55	SLIEPENBEEK & VAN BROEKHOVEN (1995)
Reino Unido	30-60	BS 8206-2 (1992)

Fibras ópticas constituem-se em uma tecnologia relativamente nova que tem encontrado diferentes aplicações. Inicialmente foram utilizadas em telecomunicações, onde a informação é transmitida através de sinais de luz. Desde os anos 90, esta tecnologia tem sido utilizada em sistemas de iluminação com fonte de luz remota (*remote-source lighting systems*). Nesta técnica, a luz é transportada através de um veículo desde sua fonte até um ou mais pontos remotos; e o veículo pode ser composto por cabos de fibra óptica. Este recurso tem sido usado em museus, painéis de propaganda, iluminação submersa de piscinas e também de suas bordas, contornos de edificações, corredores de teatros e aviões, etc.

Essa tecnologia vem crescendo rapidamente e a pesquisa desenvolvida parte do princípio que se luz artificial pode ser transportada através de cabos de fibra óptica, estes poderiam ser utilizados para transportar luz natural para o interior de edificações. A integração da luz natural com o sistema de iluminação artificial produziria reduções no consumo com iluminação e conseqüentemente no consumo total da edificação, além de contribuir para a redução da poluição ambiental.

Em vista do exposto, foi desenvolvida uma análise teórica para verificar o potencial de economia de energia que poderia se obter através do uso de fibras ópticas para transportar luz natural para o interior de edificações onde exista integração com o sistema de iluminação artificial.

2. OBJETIVO

O principal objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia desenvolvida para avaliar o potencial de economia de energia em edificações através da utilização de fibras ópticas em sistemas de iluminação.

3. METODOLOGIA

Melhorar os ganhos de luz natural no interior de edificações para reduzir a dependência do sistema de iluminação artificial deveria ser considerada como uma das formas mais fáceis de melhorar a eficiência energética e reduzir a poluição ambiental associada à geração de energia elétrica.

A primeira parte da pesquisa foi concentrada em avaliar e quantificar a provisão de luz natural provável de se obter na superfície de trabalho de salas de diferentes dimensões e diferentes áreas de janela. Esta análise, que foi desenvolvida através do cálculo de CLDs, ou Coeficientes de Luz Diurna (*Daylight Factors*), quantifica o problema da falta de luz natural na superfície de trabalho mais afastada da janela. O cálculo da economia de energia que poderia ser obtida através desta análise identifica se existe potencial de economia de energia em iluminação através do uso de fibras ópticas para transportar luz natural para as superfícies mais afastadas da janela. Como esta análise não leva em consideração os efeitos térmicos relacionados às áreas envidraçadas, simulação computacional foi então usada para identificar a área de janela na qual exista um balanço entre carga térmica e provisão de luz natural. Tal área de janela é chamada de Área Ideal de Janela (GHISI & TINKER, 2001).

Antes que as simulações pudessem ser realizadas, foi necessário selecionar um programa computacional para modelagem termodinâmica adequado às necessidades deste trabalho. Programas computacionais deste tipo vêm sendo utilizados desde os anos 70 e muitos outros têm sido lançados no mercado. Procurou-se selecionar um programa devido não apenas à sua confiabilidade, mas

também à sua disponibilidade. O programa selecionado foi o VisualDOE, que é uma versão comercial baseada no DOE-2.1E. A sua principal vantagem sobre os outros programas é que ele roda em computadores pessoais. Através de seu uso, pode-se desenvolver análises térmicas e energéticas de edificações, desde que dados climáticos e detalhes relativos à edificação sejam disponíveis como dados de entrada.

Tendo selecionado o VisualDOE para simulação do consumo de energia, o programa foi validado para garantir a sua capacidade de prever o consumo mensal de energia com ou sem integração de iluminação natural. A capacidade do programa de fornecer dados confiáveis de consumo de energia foi identificada através da simulação de um edifício localizado no campus da Universidade de Leeds, Inglaterra. O potencial de economia de energia devido à integração de luz natural foi avaliado através da simulação de uma sala no edifício da engenharia civil da Universidade de Leeds.

Finalizada a validação, salas de diferentes dimensões, diferentes áreas de janela e diferentes geometrias (relação largura/profundidade) foram simuladas. O objetivo principal dessas simulações foi obter a Área Ideal de Janela de tais salas. Para verificar a influência das condições climáticas e da localização geográfica na provisão de luz natural e na Área Ideal de Janela, sete cidades no Brasil e uma na Inglaterra foram consideradas nas simulações. A metodologia usada na primeira parte do trabalho relacionada aos CLDs foi então usada novamente para avaliar o suprimento de luz natural e a economia de energia com iluminação provável de ser obtida quando se utiliza a Área Ideal de Janela. Portanto, o potencial de economia de energia com iluminação devido à aplicação de fibras ópticas foi avaliado para cada tamanho de sala, geometria e Área Ideal de Janela.

Verificado o potencial de economia de energia com iluminação devido ao uso de fibras ópticas, um modelo reduzido foi construído para avaliar a precisão de tal potencial. Fibras ópticas foram instaladas no modelo para avaliar a economia de energia quando existe integração da luz natural vinda através da janela com aquela vinda do sistema de iluminação artificial.

No final do trabalho, realizou-se uma análise econômica comparando os custos associados com a provisão de luz natural através de janelas apenas e também através de janelas e sistemas de fibras ópticas. Finalmente, avaliou-se o impacto ambiental considerando a redução da emissão de gases para a atmosfera em razão da economia de energia provocada pela utilização de fibras ópticas.

3.1 Provisão de luz natural através das janelas

Esta etapa da metodologia visou mapear o comportamento dos CLDs em salas de diferentes dimensões e diferentes áreas de janela para estimar a economia de energia com luz artificial. O procedimento para calcular os CLDs foi o apresentado por HOPKINSON et al. (1966), e BRE Digest (1986a, b).

O Coeficiente de Luz Diurna (CLD) representa a taxa entre a iluminância interna e a externa da luz natural sob condições de céu encoberto. É composto da luz natural total incidindo em um ponto de referência em um ambiente e conta com três componentes: o componente de céu, o componente refletido externamente e o componente refletido internamente.

Existem diferentes métodos para calcular o componente de céu. Como se pretendia neste trabalho calculá-lo para uma grande quantidade de pontos e de ambientes, decidiu-se por utilizar as tabelas desenvolvidas no *Building Research Station* (atual *Building Research Establishment*) onde se obtém o componente de céu em função da geometria da janela obtida em cada ponto de interesse (HOPKINSON et al. (1966), and BRE (1986a)).

O céu encoberto padrão da CIE (*Commission Internationale de L'Éclairage*), que representa uma condição crítica de projeto, foi a condição escolhida apesar de subestimar os níveis de iluminância interna como relatado na literatura (LITTLEFAIR, 1992; TREGENZA, 1980). Este céu é aquele em que o horizonte é mais escuro que o zênite e sua luminância não varia com o azimute.

3.1.1 Os Modelos

Os modelos nos quais os CLDs foram calculados consistiram de salas cuja relação entre largura e

profundidade foram 2:1, 1,5:1, 1:1, 1:1,5, e 1:2, como mostra a Figura 1. Estas cinco geometrias foram escolhidas para comparar o suprimento de luz natural em salas estreitas com o suprimento em salas profundas. Como referência, a primeira dimensão é a da parede na qual a janela se localiza.

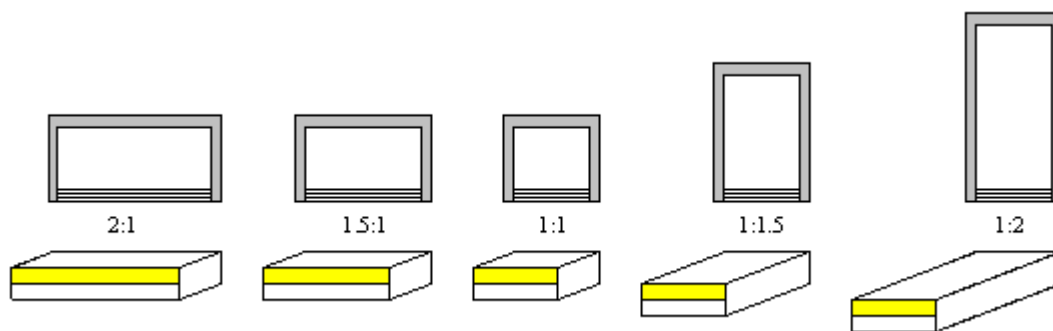


Figura 1. Planta baixa e vista isométrica das cinco geometrias de salas.

Para avaliar a influência do tamanho da sala no suprimento de luz natural, cada geometria foi avaliada em dez tamanhos diferentes. As dimensões foram calculadas através da fórmula do índice de ambiente (K) como usado em projetos luminotécnicos. Tal índice indica a relação entre área, perímetro e altura de montagem entre a superfície de trabalho e o teto. Em catálogos, existem normalmente dez índices de ambiente variando de 0,60 a 5,00. A equação 1 apresenta a fórmula deste índice (CIBSE, 1999).

$$K = \frac{LP}{(L + P)h} \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

- K É o índice de ambiente (adimensional)
- L É a largura total da sala (m);
- P É a profundidade total da sala (m);
- h É a altura de montagem entre a superfície de trabalho e o teto (m).

A Tabela 2 apresenta as dimensões das salas para os dez índices de ambiente e cinco geometrias usando a equação 1. O pé-direito é tomado como 2,80m e a altura da superfície de trabalho como 0,75m acima do nível do piso, ou seja, a altura de montagem, é de 2,05m.

Como mostra a Figura 2, cada sala foi avaliada para quatro diferentes áreas de janela. A terceira área de janela (73,2%) é aquela na qual a altura do peitoril coincide com a altura da superfície de trabalho.

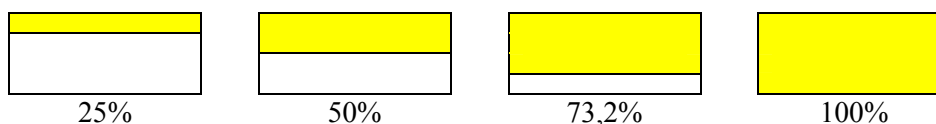


Figura 2. Áreas de janela das salas.

Para avaliar a distribuição de luz natural nas salas, cada piso foi dividido em retângulos hipotéticos, com dimensões aproximadas de 50x50cm. O CLD foi calculado no centro de cada retângulo, na altura da superfície de trabalho.

Tabela 2. Dimensões das salas para cada índice de ambiente (K) e geometria.

K	Geometria (largura:profundidade)									
	2:1		1,5:1		1:1		1:1,5		1:2	
	L (m)	P (m)	L (m)	P (m)	L (m)	P (m)	L (m)	P (m)	L (m)	P (m)
0,60	3,69	1,85	3,08	2,05	2,46	2,46	2,05	3,08	1,85	3,69
0,80	4,92	2,46	4,10	2,73	3,28	3,28	2,73	4,10	2,46	4,92
1,00	6,15	3,08	5,13	3,42	4,10	4,10	3,42	5,13	3,08	6,15
1,25	7,69	3,84	6,41	4,27	5,13	5,13	4,27	6,41	3,84	7,69
1,50	9,23	4,61	7,69	5,13	6,15	6,15	5,13	7,69	4,61	9,23
2,00	12,30	6,15	10,25	6,83	8,20	8,20	6,83	10,25	6,15	12,30
2,50	15,38	7,69	12,81	8,54	10,25	10,25	8,54	12,81	7,69	15,38
3,00	18,45	9,23	15,38	10,25	12,30	12,30	10,25	15,38	9,23	18,45
4,00	24,60	12,30	20,50	13,67	16,40	16,40	13,67	20,50	12,30	24,60
5,00	30,75	15,38	25,63	17,08	20,50	20,50	17,08	25,63	15,38	30,75

3.1.2 Procedimento para estimar a economia de energia em iluminação

Após calcular os CLDs para cada sala e área de janela, o procedimento usado para estimar a economia de energia em iluminação artificial pode ser finalizado. Como um exemplo, a Figura 3 mostra os CLDs calculados no centro de cada um dos 25 retângulos de uma sala quadrada cujo índice de ambiente é 0,60 e a área de janela 73,2%. A estimativa de economia de energia que poderia ser obtida em iluminação artificial foi baseada nas seguintes hipóteses:

- (a) Se o mais baixo CLD calculado na sala for igual ou maior que o CLD de projeto, a luz natural atingindo a superfície de trabalho seria suficiente para suprir as necessidades de iluminação sobre toda a superfície de trabalho e o sistema de iluminação artificial poderia ser desligado.
- (b) Se o mais alto CLD calculado na sala for menor que o CLD de projeto, a luz natural atingindo a superfície de trabalho seria inferior às necessidades, mas não deveria ser desconsiderada pois pode proporcionar economia de energia quando integrada ao sistema de iluminação artificial.

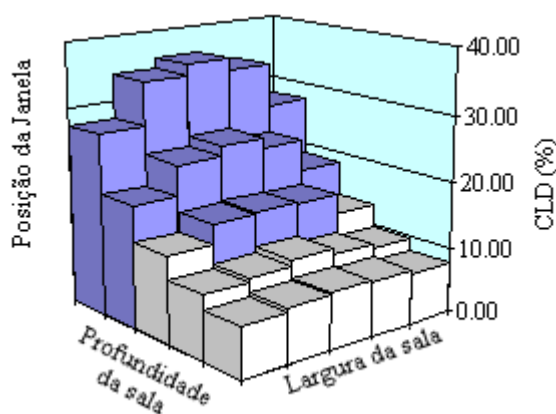


Figura 3. CLD em uma sala quadrada com índice de ambiente 0,60 e área de janela 73,2%.

Para estimar a economia de energia em iluminação na sala, cada CLD foi hipoteticamente assumido como um valor de referência que atende as necessidades de iluminação na superfície de trabalho e os outros CLDs foram comparados ao valor de referência. Assim, duas análises foram feitas. Primeiro, calculou-se a porcentagem de área de piso próxima à janela na qual os CLDs são maiores do que o valor de referência. Para o resto da sala, onde os CLDs são menores do que o valor de referência, calculou-se a porcentagem de contribuição de cada um deles comparado ao valor de referência. Essas porcentagens podem ser facilmente calculadas, pois cada CLD representa a mesma fração de área da sala (os retângulos de cada sala têm a mesma dimensão). Por exemplo, quando o valor de referência

na Figura 3 for 16%, existem 13 retângulos (marcados em azul escuro) cujo CLD é igual ou maior que 16%. Assim, a porcentagem de área da sala na qual o sistema de iluminação artificial poderia ser desligado é de 52%, obtido da fração $100 \times 13 / 25$, onde 25 é o número total de CLDs (retângulos). Sugere-se que a iluminação artificial no fundo da sala seja considerada para complementar as necessidades de iluminação, pois os CLDs nesta área, embora inferiores ao valor de referência de 16%, podem contribuir para a economia de energia. Para o exemplo em questão, a luz natural no fundo da sala supre 61,2% das necessidades de iluminação.

Portanto, considerando que geralmente o sistema de iluminação artificial é uniformemente distribuído no teto, as economias calculadas com base nesses modelos podem ser assumidas como as economias no sistema de iluminação artificial. Para o exemplo apresentado acima, onde 52% da área de piso tem CLDs maiores que o valor de referência, pode-se afirmar que 100% da densidade de potência em iluminação (W/m^2) pode ser desligada em 52% da área da sala. Com relação ao resto da sala (48% da área de piso), 61,2% da densidade de potência de iluminação pode ser desligada. Assim, a economia total de energia relacionada ao sistema de iluminação artificial para este caso seria de 81,4% ($0,52 \times 1,00 + 0,48 \times 0,612$) para um CLD de 16% e para um sistema de iluminação dimerizável. Este procedimento é então repetido para cada CLD sendo considerado como o valor de referência.

3.2 Simulações computacionais

Nas etapas anteriores, verificou-se o efeito de diferentes áreas de janela na provisão de luz natural na superfície de trabalho de salas com diferentes tamanhos e geometrias, sem considerar os efeitos térmicos relacionados à áreas envidraçadas e suas implicações no consumo de energia das salas.

Quando a luz natural que entra em uma edificação através das janelas é integrada com o sistema de iluminação artificial, economias de energia podem ser determinadas conforme o exposto anteriormente. Em edifícios ventilados naturalmente, tais economias estão relacionadas a economias no sistema de iluminação artificial apenas. Em edifícios condicionados artificialmente, a integração da luz natural com o sistema de iluminação artificial provoca economias de energia não apenas no sistema de iluminação artificial, mas também no sistema de ar condicionado, graças à redução da carga térmica produzida pelo sistema de iluminação artificial.

Grandes áreas envidraçadas permitem que mais luz natural chegue à superfície de trabalho, mas elas também permitem a entrada de carga térmica solar indesejável, o que pode aumentar o consumo de ar condicionado. Portanto, essa etapa da metodologia investigou a área de janela de espaços onde exista um balanço entre o suprimento de luz natural e a carga térmica solar. Tal área de janela foi chamada de Área Ideal de Janela e é aquela em que é mais baixo o consumo de energia do ambiente.

A Área Ideal de Janela foi verificada através de simulações computacionais usando o programa VisualDOE, que foi validado e considerado adequado para ser utilizado no trabalho do qual este artigo deriva (GHISI, 2002). As mesmas salas usadas em etapa anterior, com cinco geometrias (Figura 1) e dez tamanhos (Tabela 2), foram simuladas para identificar as respectivas Áreas Ideais de Janela, sob condições artificiais de condicionamento.

Quanto à área envidraçada para cada sala, de forma a facilitar a identificação da Área Ideal de Janela, as simulações foram realizadas considerando áreas de janela variando de 0 a 100% da área da fachada, com incrementos de 10% (Figura 4).

Definidas as salas e áreas de janela a serem simuladas, um modelo composto por dez pavimentos foi selecionado para ser utilizado nas simulações.

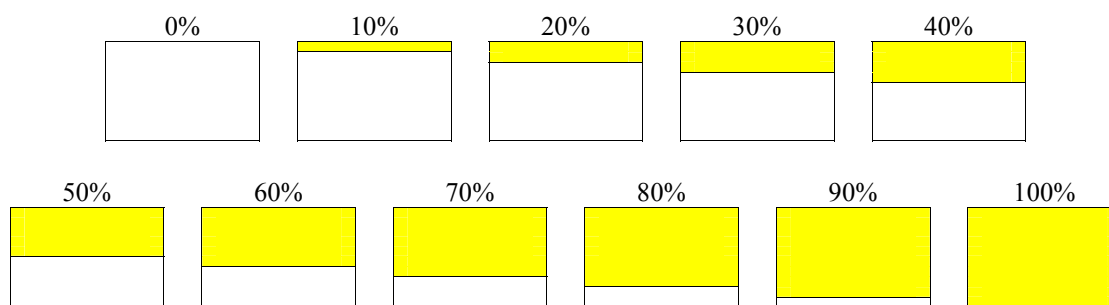


Figura 4. Áreas de janela para as salas simuladas.

3.2.1 As cidades

O consumo de energia de um edifício depende, dentre outros fatores, das condições climáticas referentes à sua localização e da disponibilidade de luz natural se existe integração com o sistema de iluminação natural. Dessa forma, foi necessário determinar o consumo de energia do modelo sob diferentes condições climáticas. Uma faixa de climas foi definida e cidades tendo aquele clima foram selecionadas. Como o trabalho foi desenvolvido no Reino Unido, a seleção de uma cidade de lá foi considerada adequada; e como dispunha-se de dados climáticos para cidades no Brasil, sete cidades foram selecionadas para completar a análise.

No Reino Unido, selecionou-se a cidade de Leeds. Os dados climáticos foram obtidos do *British Atmospheric Data Centre* para o período de Abril de 1999 a Março de 2000 e convertidos para o formato utilizado pelo programa. No Brasil, as sete cidades selecionadas foram Belém, Brasília, Curitiba, Florianópolis, Natal, Rio de Janeiro e Salvador. Os dados climáticos dessas cidades foram obtidos do LabEEE/UFSC já no formato utilizado pelo VisualDOE. Como a localização geográfica afeta a disponibilidade de luz natural, a latitude e a longitude das oito cidades selecionadas são apresentadas na Tabela 3. As cidades brasileiras estão localizadas entre as latitudes $-01^{\circ}27'$ e $-27^{\circ}36'$, no hemisfério sul; a cidade de Leeds está localizada na latitude $53^{\circ}48'$, no hemisfério norte.

Tabela 3. Latitude e longitude das oito cidades.

Cidade	Latitude	Longitude
Belém	$-01^{\circ}27'$	$-48^{\circ}30'$
Natal	$-05^{\circ}48'$	$-35^{\circ}13'$
Salvador	$-12^{\circ}58'$	$-38^{\circ}31'$
Brasília	$-15^{\circ}47'$	$-47^{\circ}56'$
Rio de Janeiro	$-22^{\circ}54'$	$-43^{\circ}12'$
Curitiba	$-25^{\circ}26'$	$-49^{\circ}16'$
Florianópolis	$-27^{\circ}36'$	$-48^{\circ}33'$
Leeds	$53^{\circ}48'$	$-1^{\circ}34'$

3.2.2 Dados de entrada

Em todas as simulações foram consideradas as diferenças de uso da edificação entre Inglaterra e Brasil, tais como padrões de ocupação, tipos de componentes construtivos, clima etc.

Para as simulações nas cidades brasileiras, considerou-se uma ocupação de 100% das 8h às 12h e das 14h às 18h, com iluminação artificial e equipamentos operando no mesmo período. A temperatura de *set-point* de verão foi definida como 24°C , sem aquecimento no inverno. Para as simulações sob as condições climáticas de Leeds, a temperatura de *set-point* de 23°C foi assumida para condições de verão e 20°C para aquecimento no inverno. A ocupação foi assumida como sendo 100% entre 9h e 17h, com iluminação artificial e equipamentos operando no mesmo período.

As propriedades térmicas das paredes e cobertura foram consideradas diferentemente para cada país. Detalhes podem ser obtidos em GHISI (2002).

3.2.3 Área Ideal de Janela

A Área Ideal de Janela para cada um dos dez tamanhos de sala (índices de ambiente), cinco geometrias e quatro orientações para cada uma das oito cidades foi obtida através dos resultados de consumo de energia gerado nas simulações em função da área de janela. As Áreas Ideais de Janela foram determinadas para permitir a verificação do potencial de economia de energia em iluminação devido ao uso de fibras ópticas.

Para cada cidade e geometria de salas, as Áreas Ideais de Janela foram plotadas em função do índice de ambiente para as quatro orientações. Notou-se um crescimento linear das Áreas Ideais de Janela de acordo com o aumento do índice de ambiente. Portanto, a melhor reta e a respectiva equação foram determinadas para expressar a Área Ideal de Janela como uma função do índice de ambiente para cada orientação. Este procedimento foi então adotado para determinar a Área Ideal de Janela para os diferentes tamanhos de salas, geometrias e orientações em cada uma das oito cidades.

3.3 Potencial de economia de energia

Tendo obtido as Áreas Ideais de Janela para as diferentes salas para cada cidade, verificou-se o impacto que tal área de janela teria no suprimento de luz natural. Neste sentido, o procedimento relacionado ao cálculo dos CLDs descrito anteriormente foi novamente utilizado, para determinar as economias de energia com iluminação artificial que poderiam ser obtidas devido ao suprimento de luz natural na superfície de trabalho de cada sala. Tal análise permite identificar o provável potencial de economia de energia em iluminação, caso sejam usadas fibras ópticas para transportar luz natural para a superfície de trabalho no fundo da sala.

A análise foi desenvolvida com base em uma iluminância de 500lux na superfície de trabalho, para todas as salas e em todas as cidades. Com relação à iluminância média externa, 5000lux foi o valor usado para Leeds, o que representa aproximadamente o valor usual de projetos de luz natural no Reino Unido. Para as sete cidades brasileiras, uma iluminância externa de 10000lux foi assumida pois representa um valor típico para céu encoberto (TREGENZA & LOE, 1998). Essas iluminâncias externas relativamente baixas garantirão que as economias em iluminação calculadas sejam as mínimas esperadas e que o potencial de economia a ser obtido através do uso de fibras ópticas seja máximo.

3.4 Fibras ópticas

A análise das etapas anteriores mostrou que a integração da luz natural com o sistema de iluminação artificial pode fornecer significativa economia de energia em iluminação. No entanto, deve-se notar que existe um alto potencial de economia que poderia ser obtido com o suprimento de luz natural no fundo das salas. Essa etapa da metodologia avalia a possibilidade de se utilizar fibras ópticas como uma tecnologia para trazer luz natural para o fundo das salas onde o suprimento através das janelas é baixo.

A avaliação é desenvolvida usando um experimento projetado para verificar a economia de energia que poderia ser obtida através do uso de fibras ópticas para fornecer iluminação vinda do teto, como em um sistema tradicional de iluminação. A economia de energia obtida nesse experimento será comparada com as previsões obtidas em etapas anteriores para um ambiente localizado em Leeds, com índice de ambiente e geometria específicos.

3.4.1 Descrição do modelo

Como verificou-se que salas de maior profundidade e maior tamanho apresentam um maior potencial de economia de energia em iluminação devido ao uso de fibras ópticas, a geometria de sala selecionada para ser usada neste experimento foi 1:2, e as dimensões referentes ao índice de ambiente de 1,50. Logo, uma sala medindo 4,61x9,23m com 2,80m de pé-direito foi selecionada (Tabela 2). Devido às dificuldades em se construir um modelo com tais dimensões, foi construído um modelo reduzido, em escala de 1/5, resultando nas dimensões de 92x184cm com 56cm de pé-direito. A altura da superfície de trabalho foi considerada 75cm acima do piso, equivalente a 15cm no modelo

reduzido.

Com relação à área de janela, foram novamente consideradas as quatro áreas utilizadas em outras etapas desta metodologia (Figura 2). Outros detalhes do modelo podem ser obtidos em GHISI (2002).

Duas lâmpadas incandescentes foram instaladas no teto do modelo. Para evitar erros devido a integração de luz artificial em modelos reduzidos, a iluminância na superfície de trabalho foi controlada usando um reostato, de forma a obter-se uma iluminância de 500lux na superfície de trabalho. Dois luxímetros foram instalados na superfície de trabalho do modelo e todas as bordas do mesmo foram seladas, para evitar a entrada de luz. O consumo de energia devido ao sistema de iluminação artificial (lâmpadas incandescentes) foi obtido por um medidor de kWh.

3.4.2 O sistema de fibras ópticas

O objetivo deste experimento era avaliar a possibilidade de se usar fibras ópticas para transportar luz natural, mas como o experimento foi projetado para verificar a economia de energia em iluminação que poderia ser obtida em edificações, um sistema de fibras ópticas com fonte de luz artificial foi usado. O sistema utilizado consiste de uma fonte de luz artificial de 150W e seis cabos de fibras ópticas de 3 metros cada (Figura 5).

Os seis cabos de fibras ópticas foram posicionados no teto do modelo e simetricamente distribuídos em torno da lâmpada localizada no fundo do mesmo, onde os níveis de luz natural são reduzidos. Uma vista interna do modelo é apresentada na Figura 6.



Figura 5. Sistema de fibras ópticas utilizado.



Figura 6. Vista interna do modelo reduzido.

3.4.3 Período de medições

Medições de níveis de iluminação e consumo de energia foram realizadas em um período de dez dias, entre 2 e 18 de outubro de 2000, entre 10h e 17h.

3.4.4 Metodologia

O primeiro passo foi medir o consumo de energia das duas lâmpadas para fornecer uma iluminância de 500lux na superfície de trabalho sem integração de luz natural ou de luz artificial advinda das fibras ópticas. Essa medição forneceu um consumo de referência a ser usado para verificar a economia obtida com a integração de luz natural.

Na parte seguinte do experimento usou-se diferentes áreas de janela e foram medidos o consumo de energia e os níveis de iluminação na superfície de trabalho para três situações:

- (1) As lâmpadas foram acesas para complementar a luz natural vinda da janela, de forma a se obter 500lux na superfície de trabalho. Iluminação pelas fibras ópticas não foi considerada. Essa etapa permitiu a determinação da economia de energia em iluminação devida à integração de luz natural.

- (2) As lâmpadas foram acesas para complementar tanto a luz natural vinda da janela como a luz fornecida pelas fibras ópticas. O sistema de fibras ópticas teve sua tensão controlada de forma a contribuir com 50lux na superfície de trabalho, enquanto as lâmpadas foram controladas para complementar os 500lux desejados na superfície de trabalho.
- (3) A parte final foi semelhante à descrita no item 2, mas o sistema de fibras ópticas teve a tensão controlada, de forma a contribuir com 300lux na superfície de trabalho.

Para as situações 2 e 3, as iluminâncias de 50lux e 300lux, fornecidas pelo sistema de fibras ópticas, foram tomadas aleatoriamente para representar um cenário próximo ao real, onde as fibras ópticas seriam utilizadas para transportar luz natural e as iluminâncias não serão fixas. Nível de iluminação de 500lux não foi considerado, pois isso conduziria a uma situação sem necessidade de iluminação artificial e, portanto a 100% de economia em iluminação.

Os níveis de iluminação natural na superfície de trabalho do modelo foram medidos a cada 15 minutos e o reostato foi ajustado de forma a se obter 500lux para as 3 situações acima descritas.

3.5 Análise econômica e impacto ambiental

Verificou-se que a integração de luz natural com o sistema de iluminação artificial pode contribuir com significativa economia de energia em iluminação e que a instalação de fibras ópticas para transportar luz natural para o fundo dos ambientes pode aumentar essa economia. Análises econômicas foram, portanto, desenvolvidas para avaliar a viabilidade de tal integração para cada uma das dez salas, cinco geometrias e cada uma das oito cidades, considerando a Área Ideal de Janela.

Para verificar se as fibras ópticas serão uma tecnologia economicamente viável de ser aplicada em edificações, duas avaliações foram feitas. A primeira verificou a viabilidade econômica de se integrar a iluminação artificial com a luz natural vinda apenas da janela. A segunda, a viabilidade econômica de se integrar a iluminação artificial com a luz natural vinda da janela e de fibras ópticas. A análise foi desenvolvida utilizando os métodos: período de retorno, período de retorno corrigido e taxa interna de retorno.

Com relação à questão ambiental, muitas pessoas não estão conscientes que a operação de edificações está associada a custos ambientais. A energia utilizada para operar o sistema de iluminação artificial em muitos países origina-se da queima de combustíveis fósseis (carvão, gás e óleo) e este processo contribui para a poluição ambiental através da produção e emissão de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases na atmosfera. No caso de hidroeletricidade, existem indicações de que os reservatórios das usinas hidroelétricas emitem dióxido de carbono e metano, mas não existem dados publicados que quantifiquem tais emissões. Portanto, no caso das sete cidades brasileiras, os benefícios ambientais produzidos pela integração de luz natural com o sistema de iluminação artificial não pode ser calculado. Quanto aos benefícios ambientais da economia de energia em Leeds, a quantidade de gases que deixa de ser emitida foi calculada usando-se dados publicados por LANCASHIRE & FOX (1996).

4. CONCLUSÕES

A pesquisa desenvolvida com base na metodologia aqui apresentada mostrou que fibras ópticas podem aumentar a economia de energia em iluminação e melhorar a eficiência energética de edificações. No entanto, a economia de energia em iluminação obtida pela integração de luz natural com artificial, quando a primeira atinge a superfície de trabalho através da janela, é significativamente maior do que quando fibras ópticas são usadas para transportar luz natural para o fundo de salas. Verificou-se que o uso de fibras ópticas pode aumentar a economia de energia, mas representa um investimento não tão atrativo como a integração da luz artificial com a natural advinda da janela.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANDALA, A.I. (1995). *Importance of the Mexican lighting systems in commerce and services*. In: Right Light Three, 3rd European Conference on Energy-Efficient Lighting Proceedings. Volume I: presented papers. England, 163-170.
- BRE (1986a). *BRE Digest 309 - Estimating daylight in buildings: Part 1*. Building Research Establishment Digest, Watford, England, 8p.
- BRE (1986b). *BRE Digest 310 - Estimating daylight in buildings: Part 2*. Building Research Establishment Digest, Watford, England, 8p.
- BS 8206-2 (1992). *Lighting for buildings – Part 2: Code of practice for daylighting*. British Standard, 36p.
- CIBSE (1999). *Daylighting and window design*. The Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 91p.
- EIA (1994). *Energy end-use intensities in commercial buildings*. Energy Information Administration. U.S. Department of Energy. Washington. September.
- GELLER, H.S. (1990). *Efficient electricity use: a development strategy for Brazil*. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC, 164p.
- GHISI, E. (2002). *The use of fibre optics on energy efficient lighting in buildings*. PhD thesis, School of Civil Engineering, University of Leeds, 295p.
- GHISI, E.; TINKER, J.A. (2001). *Optimising energy consumption in offices as a function of window area and room size*. Seventh International IBPSA Conference, International Building Performance Simulation Association, Rio de Janeiro, Brazil, 1307-1314, Vol. 2.
- HOPKINSON, R.G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. (1966). *Daylighting*. Heinemann, London, 606p.
- KOREAN NATIONAL TEAM (1996). *New lighting systems*. In: New lighting systems, Newsletter 1996. CADDET Energy Efficiency - Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, The Netherlands.
- LANCASHIRE, D.S.; FOX, A.E. (1996). *Lighting: the way to building efficiency*. In: Consulting-Specifying Engineer. January/96, 34-36.
- LITTLEFAIR, P.J. (1992). *Modeling daylight illuminances in building environmental performance analysis*. In: Journal of the Illuminating Engineering Society, Summer 1992, 25-34.
- MIN, G.F.; MILLS, E.; ZHANG, Q. (1995). *Energy-efficient lighting in China: problems and prospects*. In: Right Light Three, 3rd European Conference on Energy-Efficient Lighting Proceedings. Volume I: presented papers. England, 261-268.
- PROCEL (1993). *Manual de conservação de energia elétrica em prédios públicos e comerciais*. PROCEL Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica. 3^a edição, 20p.
- SLIEPENBEEK, W.; VAN BROEKHOVEN, L. (1995). *Evaluation of stimev, the all-Dutch utility-sponsored lighting rebate programs*. In: Right Light Three, 3rd European Conference on Energy-Efficient Lighting Proceedings. Volume I: presented papers. England, 247-254.
- TREGENZA, P.R. (1980). *The daylight factor and actual illuminance ratios*. In: Lighting Research and Technology, Great Britain, 12(2) 64-68.
- TREGENZA, P.; LOE, D. (1998). *The design of lighting*. E & FN Spon, London, 164p.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos que permitiu o desenvolvimento da tese de doutorado da qual este artigo é derivado; aos professores Maurício Roriz (UFSCar) e Roberto Lamberts (UFSC) pela revisão deste artigo; ao LabEEE/UFSC pelos dados climáticos das cidades brasileiras e ao *British Atmospheric Data Centre* pelos dados climáticos de Leeds.