

Potencial de economia de energia em iluminação através da utilização de fibras ópticas

Potential for energy savings on lighting by using fibre optics

Enedir Ghisi
John A. Tinker

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 fibras ópticas como um meio de transportar luz natural para o fundo dos ambientes, onde o suprimento de luz natural é baixo. Esta abordagem pode contribuir para a redução do consumo de energia em iluminação e da poluição ambiental associada ao consumo de energia em edificações. O potencial de economia de energia em iluminação utilizando fibras ópticas variou de 19,8% a 79,4% para as sete cidades no Brasil e de 56,0% a 89,2% para a cidade no Reino Unido. No estudo realizado no Reino Unido, mostrou-se também que poderia ocorrer uma redução na emissão de dióxido de carbono de 122 kg por metro quadrado de área construída por ano caso houvesse integração da iluminação artificial com a natural suprida pelas janelas. Essa redução seria de 138 kg/m² por ano caso fibras ópticas fossem consideradas na integração.

Palavras-chave: eficiência energética, sistemas de iluminação, fibras ópticas.

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. This article presents a methodology to assess the potential for energy savings on lighting due to the effective integration of daylight with artificial lighting in buildings. This research work considers the use of fibre optics, as a means of transporting daylight to the rear side of rooms where the supply of daylight is low. Such an approach may contribute to the reduction in the energy consumed by lighting and, at the same time, in the environmental pollution associated with buildings. The potential for energy savings on lighting by using fibre optics was found to range from 19.8% to 79.4% for seven cities in Brazil and from 56.0% to 89.2% for one city in the UK. In the study carried out in the UK, there was also a reduction in carbon dioxide emission of 122 kg per square metre of built area per year if there were integration of artificial lighting with daylight supplied by windows. Such a reduction would be 138 kg/m² per year if fibre optics were considered in the integration.

Keywords: energy efficiency, lighting systems, fibre optics.

Enedir Ghisi
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil
Laboratório de Eficiência
Energética em Edificações
Universidade Federal de Santa
Catarina
Campus Trindade
Caixa Postal 476
CEP 88040-900 Florianópolis- SC
- Brasil
Tel.: (48) 331-5184
E-mail: enedir@labeee.ufsc.br

John A. Tinker
School of Civil Engineering
University of Leeds
E-mail: j.a.tinker@leeds.ac.uk

Recebido em 23/04/04
Aceito em 21/09/04

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 esse problema; mas trata-se de um processo lento, e a maior parte dos edifícios – não somente no Brasil – ainda está equipada com sistemas de iluminação energeticamente ineficientes.

O consumo de energia em 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 ao sistema de iluminação.

Fibras ópticas constituem-se em uma tecnologia relativamente nova que tem encontrado diferentes aplicações. Inicialmente, foram utilizadas em telecomunicações, em que a informação é transmitida por meio de sinais de luz. Desde os anos 1990, esta tecnologia tem sido utilizada em sistemas de iluminação com fonte de luz remota (*remote-source lighting systems*). Nesta técnica, a luz é transportada por um veículo desde sua fonte até um ou mais pontos remotos; e o veículo pode ser composto de cabos de fibra óptica. Esse 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 de que se luz artificial pode ser transportada por 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 com o uso de fibras ópticas para transportar luz natural para o interior de edificações onde existe integração da iluminação natural com o sistema de iluminação artificial.

Objetivo

O principal objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia desenvolvida para avaliar o potencial de economia de energia em edificações a partir da integração do sistema de iluminação artificial com iluminação natural suprida por janelas e também transportada por fibras ópticas, bem como seus principais resultados. A metodologia foi aplicada em sete cidades no Brasil e em uma no Reino Unido.

Metodologia

A metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho é apresentada de forma sucinta, pois já foi publicada em Ghisi (2002) e em Ghisi e Tinker (2003).

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. Essa análise, que foi desenvolvida com o cálculo de Fatores de Luz Diurna (FLD) ou *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 algum potencial de economia de energia em iluminação que poderia ser obtido com o uso de fibras ópticas para transportar luz natural para as superfícies de trabalho mais afastadas da janela. Como esta análise não leva em consideração os efeitos térmicos relacionados às áreas envidraçadas, uma 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).

País	Uso final em iluminação (%)	Fonte
China	15	Min et al. (1995)
Coréia	20	Korean National Team (1996)
Brasil	24	PROCEL (1993)
México	30	Bandala (1995)
EUA	39	EIA (1994)
Holanda	55	Sliepenbeek e Van Broekhoven (1995)
Reino Unido	30-60	BS 8206-2 (1992)

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

Antes que as simulações pudessem ser realizadas, foi necessário selecionar um programa computacional para modelagem termodinâmica adequado às necessidades deste trabalho. 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.

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 mediante a simulação de um edifício localizado no campus da Universidade de Leeds, na Inglaterra. O potencial de economia de energia devido à integração de luz natural foi avaliado pela simulação de uma sala no edifício da engenharia civil da referida universidade.

Finalizada a validação, salas de diferentes dimensões, diferentes áreas de janela e diferentes geometrias (relação entre largura e 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 FLDs 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 em 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 com o uso de fibras ópticas, um modelo reduzido foi construído para avaliar a precisão na obtenção 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.

Na última etapa da pesquisa, 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 produzida pelo aproveitamento da iluminação natural.

Provisão de luz natural através das janelas

Esta etapa da metodologia visou a mapear o comportamento dos FLDs em salas de diferentes dimensões e diferentes áreas de janela para estimar a economia de energia com iluminação artificial. O procedimento para calcular os FLDs foi aquele apresentado por Hopkinson et al. (1966) e BRE Digest (1986a, 1986b), em que se obtém o componente de céu em função da geometria da janela obtida em cada ponto de interesse. 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.

Modelos

Os modelos nos quais os FLDs foram calculados consistiram de salas cujas relações entre largura e profundidade foram 2:1; 1,5:1; 1:1; 1:1,5 e 1:2, como mostra a Figura 1.

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 pela 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, que variam de 0,60 a 5,00. A equação 1 apresenta a fórmula desse índice (CIBSE, 1999).

$$K = \frac{LP}{(L+P)h} \quad (1)$$

Onde:

K é o índice de ambiente (adimensional);

L é a lagura total da sala (m);

P é a profundidade total da sala (m); e

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 2,80 m, e a altura da superfície de trabalho como 0,75m acima do nível do piso, ou seja, a altura de montagem é de 2,05 m.

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

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

Validação do componente de céu

Dos três componentes que compõem o FLD, o componente de céu é o mais importante, pois depende das condições de céu. Portanto, para validar os FLDs calculados, um modelo reduzido foi construído e utilizado para medições de iluminância.

O modelo foi construído com as dimensões 41,0 cm x 41,0 cm e altura de 11,2 cm, o que representa um ambiente real de (10,25 x 10,25 x 2,80) m, reduzido em uma escala de 1:25. O índice de ambiente tanto do modelo quanto do ambiente real é 2,50. Como o objetivo deste experimento era validar o componente de céu, modelos com quaisquer dimensões poderiam ter sido usados, desde que os componentes de céu fossem calculados para um modelo com mesmas dimensões e condições.

As superfícies internas do modelo foram pintadas de preto opaco para evitar reflexões internas. Os níveis de iluminação natural foram medidos em um ponto externo (livre de obstruções, no plano horizontal e com a fotocélula sobre o modelo) e em três pontos no interior do modelo, conforme mostrado na Figura 3.

A janela do modelo foi mantida sem vidro, e sua geometria e altura podem ser vistas na Figura 4. A área de janela considerada foi aquela de 73,2% e o peitoril coincidiu com a altura da superfície de trabalho de 3,00 cm.

As medições de iluminação natural ocorreram entre 22 e 25 de fevereiro de 2000 na cobertura do prédio da Engenharia Civil, na Universidade de Leeds. Foram usados dois luxímetros portáteis “Testo 545”.

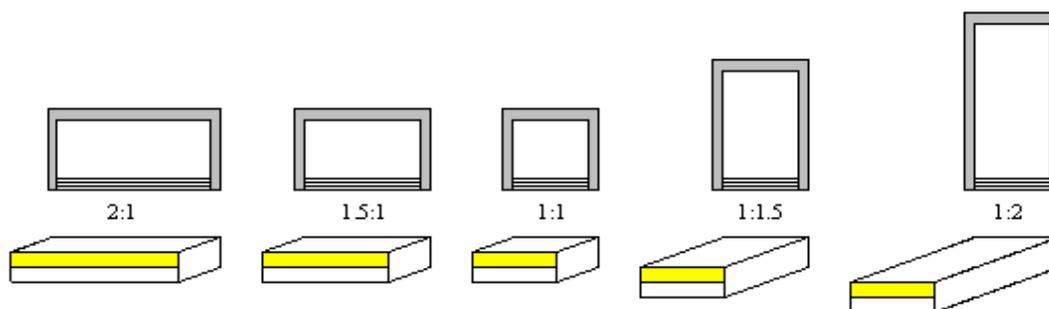


Figura 1 - Planta baixa e perspectiva das cinco geometrias de salas

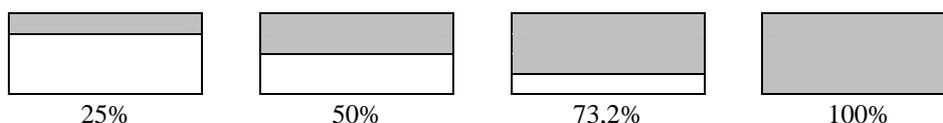


Figura 2 - Áreas de janela das salas

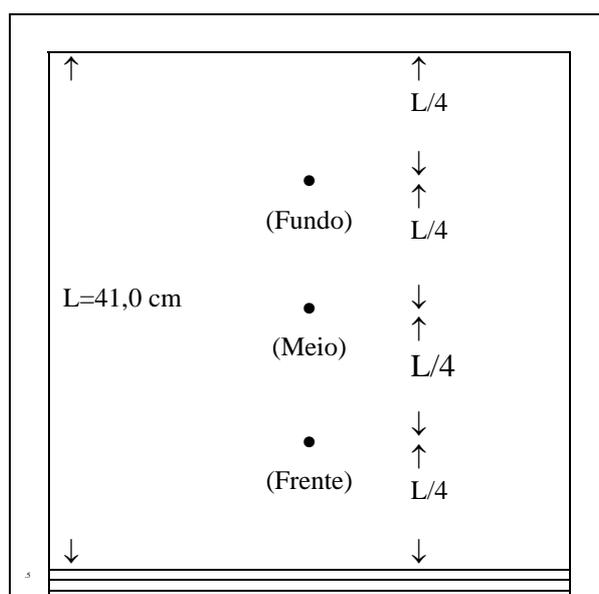


Figura 3 - Planta baixa do modelo

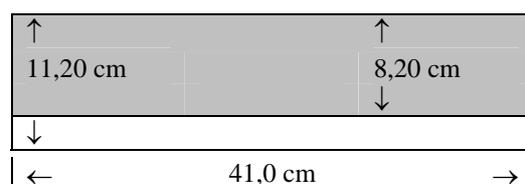


Figura 4 - Fachada do modelo

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

Tabela 2 - Dimensões das salas para cada índice de ambiente e geometria

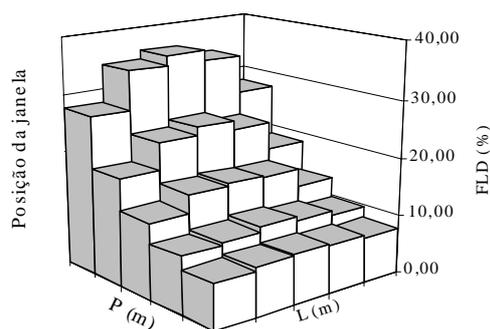


Figura 5 - FLDs em uma sala quadrada com índice de ambiente de 0,60 e área de janela de 73,2%

Como o componente de céu consistia de um único valor em cada ponto de referência, decidiu-se realizar conjuntos de medições, de forma a se obter um componente de céu médio para cada ponto. Dez conjuntos de medições foram feitos em cada ponto de referência em intervalos de aproximadamente 5 minutos em cada um dos quatro dias. Cada medida interna era imediatamente seguida de uma externa de forma, a se garantir a precisão do componente de céu.

Procedimento para estimar a economia de energia em iluminação

Após calcular os FLDs 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 5 mostra os FLDs 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 FLD calculado na sala for igual ou maior que o FLD de projeto, a luz natural atingindo a superfície de trabalho é suficiente para suprir as necessidades de iluminação sobre toda a superfície de trabalho e o sistema de iluminação artificial poderia ser desligado; e
- (b) Se o mais alto FLD calculado na sala for menor que o FLD de projeto, a luz natural atingindo a superfície de trabalho é inferior às necessidades, mas não deveria ser desconsiderada, pois pode proporcionar economia de energia quando integrada ao sistema de iluminação artificial.

Para estimar a economia de energia em iluminação na sala, cada FLD foi hipoteticamente assumido como um valor de referência que atende às necessidades de iluminação na superfície de trabalho e os outros FLDs foram comparados ao

valor de referência. Assim, duas análises foram feitas. Primeiro, calculou-se a percentagem de área de piso próxima à janela na qual os FLDs são maiores do que o valor de referência. Para o resto da sala, onde os FLDs são menores do que o valor de referência, calculou-se a percentagem de contribuição de cada um deles comparado ao valor de referência. Essas percentagens podem ser facilmente calculadas, pois cada FLD representa a mesma fração de área da sala (os retângulos de cada sala têm a mesma dimensão). Para mais detalhes, ver Ghisi (2002).

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 às áreas envidraçadas e suas implicações no consumo de energia desses ambientes.

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 ambientes onde existe um balanço entre o suprimento de luz natural e a carga térmica solar. Tal área de janela foi chamada de Área Ideal de Janela, que é aquela que proporciona o menor consumo de energia.

A Área Ideal de Janela foi verificada através de simulações computacionais usando o programa VisualDOE, que foi validado e considerado adequado para se utilizar 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%, com geometria semelhante à daquelas janelas mostradas na Figura 2. Definidas as salas e áreas de janela a serem simuladas, um modelo composto de dez pavimentos foi selecionado para ser utilizado nas simulações.

As cidades

O consumo de energia de um edifício depende, entre outros fatores, das condições climáticas referentes à sua localização e da disponibilidade de luz natural. Como o trabalho também 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.

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 interna no verão foi definida como 24°C , sem aquecimento no inverno. Para as simulações sob as condições climáticas de Leeds, a temperatura 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).

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	$53^{\circ}48'$	$-1^{\circ}34'$

Tabela 3 - Latitude e longitude das oito cidades

Área Ideal de Janela

A Área Ideal de Janela para cada um dos dez tamanhos de sala, cinco geometrias e quatro orientações para cada uma das oito cidades foi obtida a partir 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.

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. Nesse sentido, o procedimento relacionado ao cálculo dos FLDs descrito anteriormente foi de novo 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 fibras ópticas sejam usadas para transportar luz natural para a superfície de trabalho no fundo da sala.

A análise foi desenvolvida com base em uma iluminância de 500 lux na superfície de trabalho, para todas as salas e em todas as cidades. Com relação à iluminância média externa, 5.000 lux 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 10.000 lux 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 com o uso de fibras ópticas seja máximo.

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 utilizarem fibras ópticas como uma tecnologia para trazer luz natural para o fundo das salas onde o suprimento através das janelas é baixo.

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

Descrição do modelo

Como se verificou 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 o índice de ambiente foi 1,50. Logo, uma sala medindo 4,61 m x 9,23 m, com 2,80 m 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 92 cm x 184 cm, com 56 cm de pé-direito. A altura da superfície de trabalho foi considerada 75 cm acima do piso, equivalente a 15 cm no modelo reduzido.

Com relação à área de janela, foram novamente consideradas as quatro áreas utilizadas em outras etapas desta metodologia (Figura 2). Duas lâmpadas incandescentes foram instaladas no teto do modelo. Para evitar erros devido à integração de luz artificial em modelos reduzidos, a iluminância na superfície de trabalho foi controlada usando-se um reostato, de forma a obter-se uma iluminância de 500 lux na superfície de trabalho. Dois luxímetros foram instalados na superfície de trabalho do modelo e todas as bordas dele 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.

O sistema de fibras ópticas

O objetivo deste experimento era avaliar a possibilidade de se usarem 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 6).

Os seis cabos de fibras ópticas foram posicionados no teto do modelo e simetricamente distribuídos em torno da lâmpada localizada no fundo dele, onde os níveis de luz natural são reduzidos. Uma vista interna do modelo é apresentada na Figura 7.



Figura 6 - Sistema de fibras ópticas utilizado



Figura 7 - Vista interna do modelo reduzido

Período de medições

As 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.

Metodologia

O primeiro passo foi medir o consumo de energia das duas lâmpadas para fornecer uma iluminância de 500 lux 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, usaram-se as quatro áreas de janela (conforme Figura 2) e foram medidos o consumo de energia e os níveis de iluminação na superfície de trabalho para três situações:

(a) as lâmpadas foram acesas para complementar a luz natural vinda da janela, de forma a se obterem 500 lux 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;

(b) 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 50 lux na superfície de trabalho, enquanto as lâmpadas foram controladas para complementar os 500 lux desejados na superfície de trabalho; e

(c) a parte final foi semelhante à descrita no item b, mas o sistema de fibras ópticas teve a tensão controlada, de forma a contribuir com 300 lux na superfície de trabalho.

Para as situações b e c, as iluminâncias de 50 lux e 300 lux, 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 500 lux 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 obterem 500 lux para as três situações acima descritas.

Análise econômica

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 suprida apenas pela janela. A segunda, a viabilidade econômica de se integrar a iluminação artificial com a luz natural suprida pela janela e por fibras ópticas. A análise foi desenvolvida utilizando os métodos: período de retorno, período de retorno corrigido e taxa interna de retorno. A análise foi desenvolvida para cada uma das dez salas, cinco geometrias e cada uma das oito cidades, considerando a Área Ideal de Janela.

Impacto ambiental

Com relação à questão ambiental, muitas pessoas não estão conscientes de 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 devido à produção e emissão de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases para a 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 podem ser calculados. 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 e Fox (1996).

Resultados

Provisão de luz natural através das janelas

Seguindo-se a metodologia, os FLDs foram calculados para cada uma das cinco geometrias, dez tamanhos de sala e quatro áreas de janela.

Validação do componente de céu

O erro médio verificado entre componentes de céu medidos e calculados variou de $\pm 6,7\%$, próximo à

janela, a $\pm 14,1\%$, no fundo do modelo. Os erros aumentaram em direção ao fundo do modelo porque os componentes de céu são mais baixos e, portanto, mais sensíveis às variações. A Figura 8 apresenta os componentes de céu medidos nos quatro dias e também os valores calculados para os mesmos pontos. A comparação entre valores medidos e calculados mostra que não existe diferença significativa entre eles. Portanto, os componentes de céu utilizados nos cálculos dos FLDs foram considerados confiáveis.

Economia de energia em iluminação

A Figura 9 apresenta as economias de energia em iluminação que podem ser obtidas em ambientes com geometria 1:1, para os dez tamanhos de sala (índices de ambiente) e quatro áreas de janela, respectivamente. Pode ser observado que, para FLDs mais baixos, ou iluminância externa mais alta, as economias de energia em iluminação são maiores. As economias são maiores também para menores índices de ambiente, ou seja, para salas menores. Também pode ser observado através dos quatro gráficos que as economias de energia não aumentam significativamente para áreas de janela aparentemente superiores a 50%, o que indica um equívoco em termos de área de janela utilizada atualmente em edifícios. Comportamento semelhante foi observado para as outras geometrias.

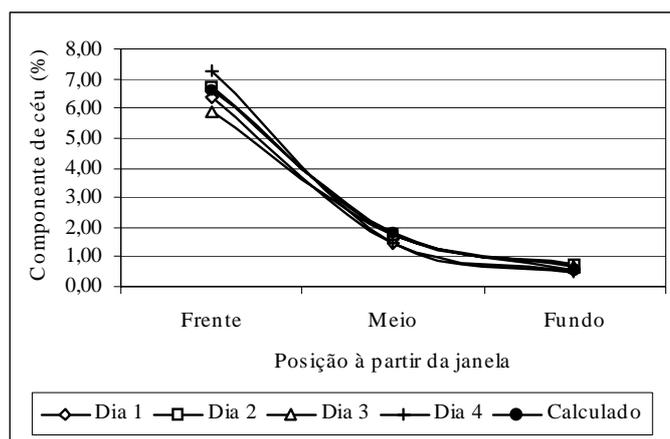


Figura 8 - Componentes de céu medidos e calculados

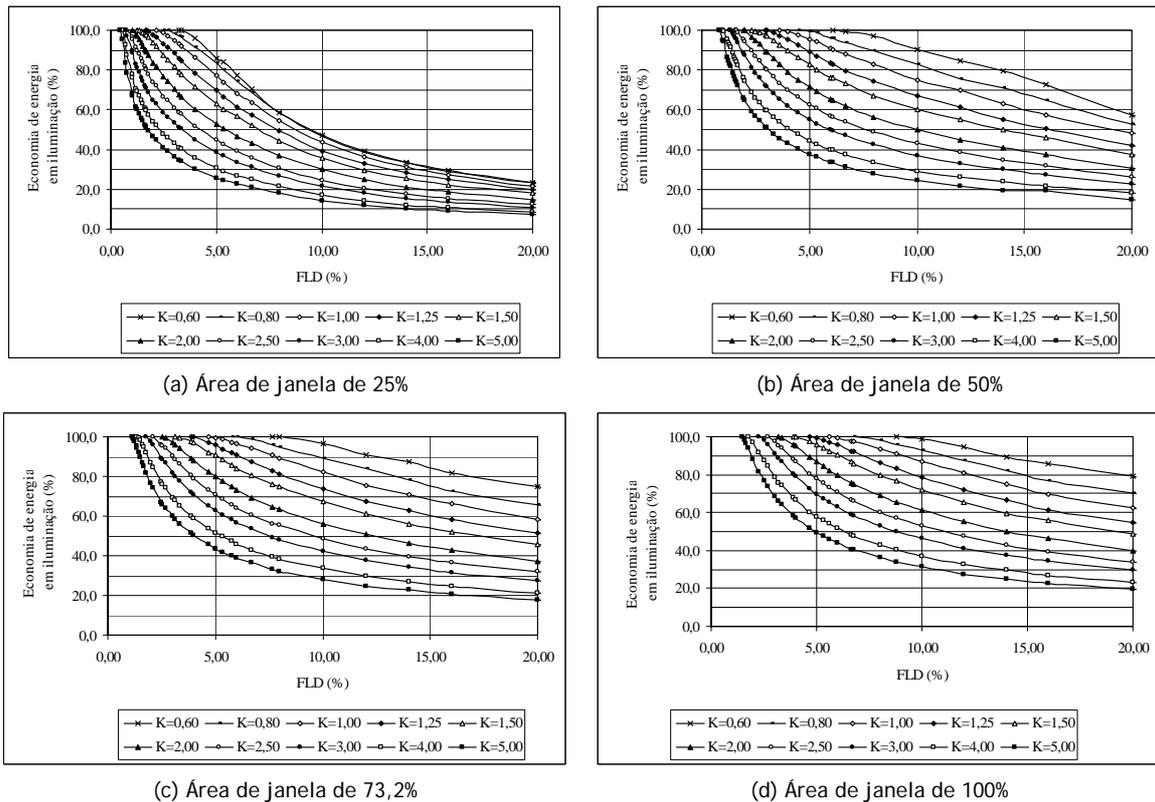


Figura 9 - Economia de energia em iluminação para geometria de 1:1

Simulações computacionais

Na seção anterior avaliou-se a provisão de iluminação natural em salas de diferentes dimensões, geometrias e áreas de janela para quantificar o potencial de economia de energia em iluminação. Tal análise foi feita através dos FLDs e os resultados mostraram que a integração da luz natural advinda das janelas com o sistema de iluminação artificial poderia proporcionar economias significativas de energia em edificações. Também foi observado que dependendo do tamanho da sala, da geometria e da área de janela, existe ainda um potencial de economia de energia que poderia ser obtido através do uso de fibras ópticas se esta tecnologia pudesse ser utilizada para transportar luz natural para o fundo dos ambientes. Este potencial aumenta à medida que diminui a área de janela das salas. Portanto, nesta etapa, o objetivo desta pesquisa foi identificar a Área Ideal de Janela das salas de forma que haja um balanço entre o suprimento de luz natural e de ganhos ou perdas de carga térmica solar.

Área ideal de janela

O consumo de energia foi simulado para o período de um ano e é apresentado em função da área de piso (kWh/m^2 por ano) para facilitar a comparação

entre os ambientes de diferentes dimensões e geometrias.

Esta seção apresenta o consumo de energia obtido através das simulações usando o programa VisualDOE para a cidade de Florianópolis, como exemplo. Os consumos de energia obtidos para Florianópolis em função da área de janela para a geometria 2:1 e para as quatro orientações são apresentados na Figura 10. A primeira observação que pode ser feita é que o consumo de energia por unidade de área diminui à medida que as salas aumentam de tamanho (maiores índices de ambiente), independentemente da orientação da fachada com janela. A mesma tendência foi observada para todas as geometrias em todas as outras cidades analisadas. Também pode ser observado que o consumo de energia dos ambientes com orientação sul é menor em comparação às outras orientações. Isto se deve ao fato de Florianópolis estar localizada no hemisfério sul, onde a fachada sul é atingida pelos raios solares por período menor em relação às outras fachadas.

Em termos de área de janela, pode-se observar que a Área Ideal de Janela é maior para salas maiores. As Áreas Ideais de Janela foram obtidas determinando a melhor curva polinomial para cada caso. Para a orientação norte, observa-se que a Área Ideal de Janela varia de 10% para $K=0,60$ a

22% para $K=5,00$. Para a orientação leste, a Área Ideal de Janela varia de 12% a 31% para $K=0,60$ a $K=5,00$, respectivamente. Na orientação sul, a Área Ideal de Janela varia de 18% para $K=0,60$ a 33% para $K=5,00$. E para a orientação oeste, pode ser observado que a Área Ideal de Janela varia de 9% a 22% para $K=0,60$ a $K=5,00$, respectivamente. Estas áreas de janela são valores bastante inferiores ao que se observa nas edificações brasileiras, indicando um provável consumo de energia desnecessário. Observa-se também na Figura 10 que, em salas pequenas, a adoção de uma área de janela diferente da Área Ideal de Janela implica aumento significativo no consumo de energia.

Como as Áreas Ideais de Janela para ambientes com geometria 2:1 são relativamente pequenas, isto pode ser uma indicação de que pode existir um incremento de potencial de economia de energia a ser obtido em iluminação artificial caso fibras ópticas sejam usadas para promover a integração da iluminação natural.

A Tabela 4 apresenta as Áreas Ideais de Janela para cada ambiente, geometria e orientação para a cidade de Florianópolis. Observa-se que a Área Ideal de Janela é maior para salas maiores (aquelas com maior índice de ambiente) e também para salas com menor largura e maior profundidade. A mesma tendência foi verificada para todas as outras cidades. Para as cidades localizadas no Brasil, a Área Ideal de Janela tende a ser maior nas orientações leste e sul, pois as condições de insolação são mais amenas nestas orientações; e tende a ser menor na orientação oeste, pois esta é a orientação sob condições solares mais severas. Para a cidade localizada no Reino Unido, as Áreas Ideais de Janela são maiores na orientação norte, pois a cidade está localizada no hemisfério norte e a carga térmica solar nesta fachada é baixa. Resultados para as outras cidades podem ser obtidos em Ghisi (2002).

Deve-se atentar que as paredes que contêm as janelas apresentam diferentes dimensões para diferentes geometrias, portanto as áreas reais de janela também são diferentes para um mesmo índice de ambiente. Por exemplo, tomando o índice de ambiente de 0,60 e as geometrias 2:1 e 1,5:1, ambas as salas apresentam Área Ideal de Janela de 15% para a orientação leste (Tabela 4). Isto representa uma área de janela de $1,55 \text{ m}^2$ para a geometria de 2:1 e $1,29 \text{ m}^2$ para a geometria 1,5:1. Como esperado, as duas salas deveriam apresentar diferentes potenciais de economia de energia em iluminação como mostrado na Tabela 5.

Potencial de economia de energia

Após obter a Área Ideal de Janela para as diferentes geometrias e tamanhos das salas para cada cidade, identificou-se o impacto dessa área de janela no suprimento de iluminação natural. Para avaliar tal impacto, a metodologia descrita no item “provisão de luz natural através das janelas” foi aplicada novamente. Tal análise também permitiu identificar o potencial de economia de energia em iluminação a ser obtido caso se utilizassem fibras ópticas para transportar iluminação natural para o fundo das salas.

Resultados de economia de energia em iluminação através do aproveitamento da iluminação natural suprida pela Área Ideal de Janela são mostrados na Tabela 5 para a cidade de Florianópolis. Os dados mostrados são baseados em uma iluminância de 500 lux na superfície de trabalho e de 10.000 lux no exterior. As economias de energia observadas variam de 20,6% a 86,2%. Portanto, o potencial de economia em iluminação quando fibras ópticas são usadas para transportar iluminação natural para o fundo dos ambientes variaria entre 13,8% e 79,4% em pequenos e grandes ambientes, respectivamente. Em estudos futuros, pretende-se avaliar a influência da variação diária e sazonal da iluminância.

Os dados obtidos indicam a tendência de se obter economias de energia em iluminação maiores nos ambientes menores (menores índices de ambiente) e nas geometrias cuja largura da fachada seja maior (geometrias 2:1, 1,5:1 e 1:1). Portanto, o potencial de economia de energia devido à aplicação de fibras ópticas é maior em ambientes maiores (com maior índice de ambiente) e fachadas menores.

A Tabela 6 apresenta um resumo dos potenciais de economia de energia em iluminação prováveis de serem obtidos nas oito cidades quando existe integração do sistema de iluminação artificial com a iluminação natural suprida pela Área Ideal de Janela e também o potencial de economia de energia em iluminação quando fibras ópticas são usadas para transportar iluminação natural para o fundo dos ambientes. A faixa observada em cada cidade deve-se aos dez índices de ambiente analisados, cinco geometrias e quatro orientações.

Fibras ópticas

As etapas anteriores avaliaram a quantidade de iluminação natural atingindo a superfície de trabalho em edifícios através da janela. Tal avaliação mostrou que a integração da iluminação natural com a artificial pode proporcionar

economias significativas de energia em iluminação. No entanto, deve-se perceber que ainda existe um alto potencial de economia de energia em iluminação que poderia ser obtido se o suprimento de iluminação natural no fundo dos ambientes fosse maior.

A Figura 11 mostra os resultados do experimento descrito no item “Fibras Ópticas”; apresenta-se uma comparação das economias de energia considerando a quantidade de luz fornecida por fibras ópticas com as economias de energia obtidas pela integração da luz natural suprida apenas pela janela. Nota-se que a

integração da luz natural suprida pela janela produz economias significativas de energia e que a incorporação de fibras ópticas para transportar luz natural para o fundo do modelo fornece um incremento de 10% a 20% na economia de energia. Isto pode ser uma indicação de que o uso de fibras ópticas para transportar luz natural para o interior de edificações pode não ser economicamente viável. O incremento observado pelo experimento é bastante inferior ao verificado teoricamente para Leeds (Tabela 6).

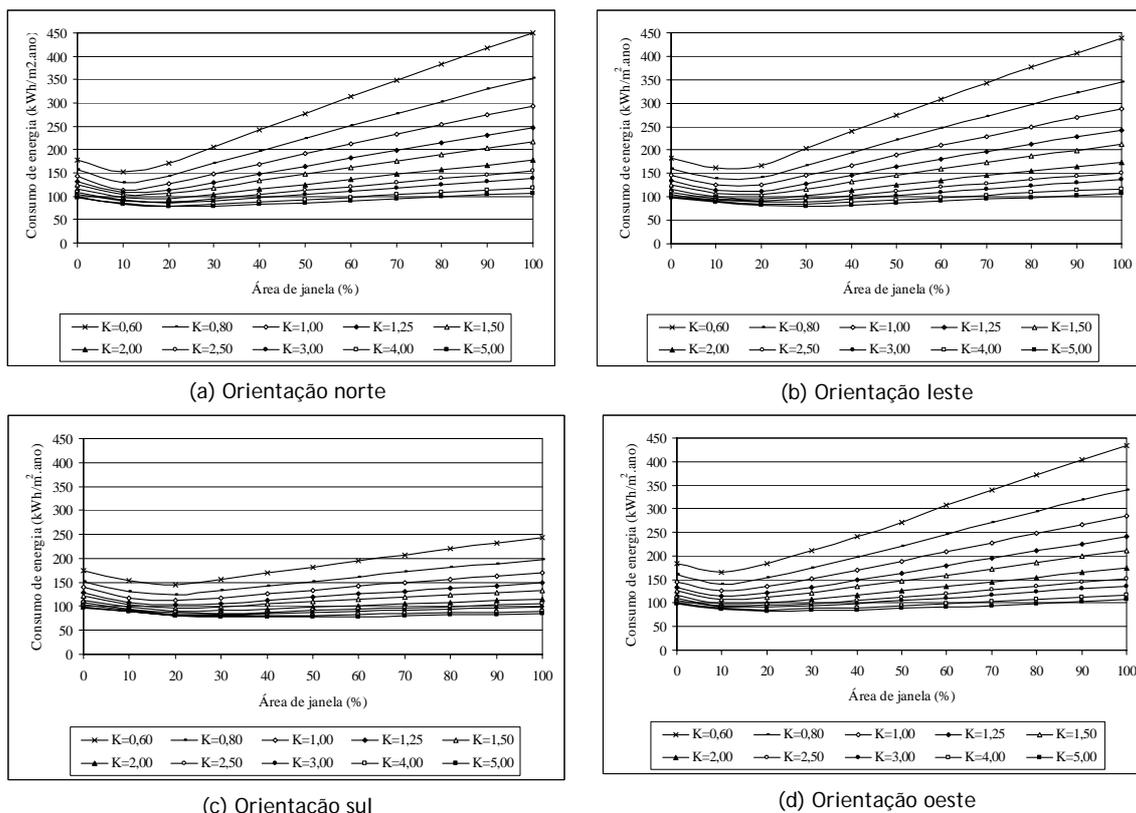


Figura 10 - Consumo de energia em ambientes com geometria de 2:1 localizados em Florianópolis

K	2:1				1,5:1				1:1				1:1,5				1:2			
	N	L	S	O	N	L	S	O	N	L	S	O	N	L	S	O	N	L	S	O
0,60	11	15	18	10	11	15	20	10	16	19	21	12	20	25	25	15	25	26	31	19
0,80	11	15	19	11	12	16	21	11	17	19	22	12	21	26	26	16	27	27	33	19
1,00	12	16	20	11	13	17	22	11	18	20	24	13	22	27	28	17	28	29	36	20
1,25	13	17	20	12	14	18	23	12	19	21	25	14	24	28	30	17	29	31	38	21
1,50	13	18	21	12	15	19	24	13	20	22	27	15	25	29	32	18	31	32	41	21
2,00	15	20	23	14	17	20	26	15	21	24	30	16	27	31	36	20	34	36	47	23
2,50	16	21	25	15	19	22	28	16	23	26	33	18	30	34	40	22	37	40	53	25
3,00	18	23	26	16	22	24	30	18	25	28	36	19	32	36	44	23	40	43	58	26
4,00	21	27	30	19	26	28	35	21	29	32	43	22	37	41	52	27	45	50	69	29
5,00	24	30	33	22	30	31	39	24	33	36	49	25	42	46	59	30	51	58	81	33

Tabela 4 - Área Ideal de Janela para Florianópolis (% da área de fachada)

K	2:1				1,5:1				1:1				1:1,5				1:2			
	N	L	S	O	N	L	S	O	N	L	S	O	N	L	S	O	N	L	S	O
0,60	51,6	69,2	82,2	44,8	47,0	60,6	86,2	42,2	54,1	61,6	75,0	42,4	58,8	74,3	74,3	45,2	64,4	66,7	74,8	48,9
0,80	46,6	69,1	84,7	46,6	56,0	70,4	85,8	44,8	58,6	67,6	76,6	42,5	61,1	71,6	71,6	44,0	62,3	62,3	69,7	44,4
1,00	51,4	70,6	83,2	50,2	52,5	67,5	84,1	42,4	60,6	66,2	74,8	42,0	56,1	64,6	66,1	45,0	58,1	58,2	65,7	43,4
1,25	50,2	65,3	76,9	45,0	52,3	63,9	75,0	43,2	55,7	62,1	69,7	40,2	53,5	60,2	62,3	40,7	50,5	54,1	59,1	40,8
1,50	47,8	66,2	72,8	44,2	51,0	60,1	71,0	42,6	53,8	56,9	65,0	39,0	50,7	54,7	58,5	38,9	48,8	49,2	54,7	37,1
2,00	44,8	59,4	64,4	42,4	47,7	55,3	64,6	43,2	46,8	50,7	58,4	37,2	44,6	47,8	51,4	36,0	41,7	43,2	48,1	32,8
2,50	42,7	53,0	59,5	38,7	44,6	49,3	57,0	37,7	43,2	46,3	53,1	35,6	39,9	42,9	46,5	33,3	37,0	38,6	43,6	28,9
3,00	41,5	48,6	53,1	37,5	44,4	45,8	52,5	37,7	38,5	42,1	47,8	32,5	36,2	38,1	42,1	28,8	33,9	35,1	40,1	26,7
4,00	36,6	43,8	46,3	34,8	38,9	40,5	45,6	34,1	35,1	36,2	41,7	28,4	31,4	32,8	36,8	26,3	28,9	30,2	34,6	22,7
5,00	32,4	38,0	40,4	31,4	35,0	36,0	40,1	30,0	30,8	32,1	37,2	25,7	27,8	29,0	32,4	23,3	25,3	26,9	30,6	20,6

Tabela 5 - Economia de energia em iluminação usando a Área Ideal de Janela em Florianópolis (%)

Cidade	Potencial de economia de energia em iluminação usando a AIJ (%)	Potencial de economia de energia em iluminação usando fibras ópticas (%)
Belém	24,8 - 70,6	29,4 - 75,2
Brasília	22,4 - 92,0	8,0 - 77,6
Curitiba	20,6 - 87,7	12,3 - 79,4
Florianópolis	20,6 - 86,2	13,8 - 79,4
Natal	17,7 - 62,1	37,9 - 82,3
Rio de Janeiro	17,7 - 82,2	17,8 - 82,3
Salvador	20,3 - 80,5	19,5 - 79,7
Leeds	10,8 - 44,0	56,0 - 89,2

Tabela 6 - Resumo do potencial de economia de energia em iluminação para as oito cidades

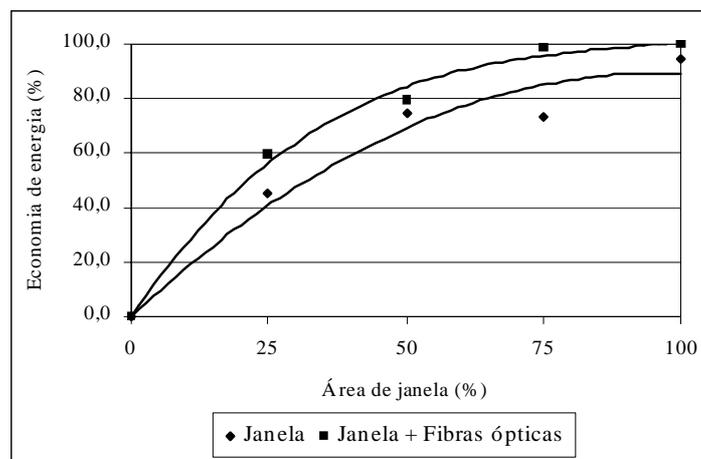


Figura 11 - Economia de energia obtida com o uso de fibras ópticas

K	Área Ideal de Janela					Área Ideal de Janela + fibras ópticas				
	2:1	1,5:1	1:1	1:1,5	1:2	2:1	1,5:1	1:1	1:1,5	1:2
0,60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	3,0	4,9	7,1	8,2
0,80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	3,7	4,5	5,5	6,7	7,4
1,00	0,0	0,0	0,0	0,2	1,0	4,6	5,0	5,8	6,5	7,1
1,25	0,0	0,0	0,0	0,7	1,3	5,0	5,3	5,9	6,5	6,8
1,50	0,0	0,0	0,4	1,0	1,5	5,3	5,5	5,9	6,4	6,7
2,00	0,2	0,5	0,9	1,3	1,7	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5
2,50	0,6	0,8	1,2	1,5	1,8	5,7	5,8	6,0	6,2	6,4
3,00	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3
4,00	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2
5,00	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	5,8	5,9	6,0	6,0	6,1

Tabela 7 - Período de retorno para Florianópolis (anos)

Análise econômica

O período de retorno do investimento (*payback*) foi calculado para todos os tamanhos de salas, geometrias e cidades. Calcularam-se períodos de retorno para duas opções: (a) luz natural suprida apenas por janelas; e (b) luz natural suprida por janelas e fibras ópticas. A Tabela 7 apresenta os resultados para Florianópolis. Os valores apresentados para cada geometria representam a média dos valores obtidos para as quatro orientações.

Como a área de janela de edifícios existentes foi assumida como sendo 50% da área da fachada, alguns ambientes que apresentaram Área Ideal de Janela baixa, tiveram um custo de investimento menor do que os edifícios atuais, resultando em um período de retorno nulo. Isso significa que tais ambientes se constituem em investimentos altamente atrativos, pois eles custarão menos do que custariam quando não existe preocupação com sua eficiência energética. Pelos resultados mostrados para Florianópolis é possível notar que investimentos para garantir a integração de iluminação artificial com luz natural suprida por janelas são mais atrativos do que com fibras ópticas e janelas. Observou-se para as oito cidades que o período de retorno é mais baixo para ambientes menores (menor índice de ambiente) e para ambientes mais largos e menos profundos

Para as cidades localizadas no Brasil, foi observado que o período de retorno máximo, quando ocorre integração da luz natural suprida por janelas, varia de 1,0 a 1,9 anos; e quando ocorre incorporação de fibras ópticas, o período de retorno máximo varia de 4,4 a 8,2 anos. Para

Leeds, o máximo período de retorno verificado foi de 2,3 anos, quando existe suprimento de luz natural somente através das janelas, e de 8,5 anos quando se usam fibras ópticas.

O período de retorno corrigido e a taxa interna de retorno também foram calculados para todos os casos. Resultados podem ser obtidos em Ghisi (2002).

Benefícios ambientais

Considerando os índices apresentados por Lancashire e Fox (1996), a quantidade de emissão de dióxido de carbono e dióxido de sulfúrio que pode ser evitada em Leeds foi calculada. Em termos médios poderia ocorrer uma redução de aproximadamente 122 kg de dióxido de carbono por metro quadrado por ano em escritórios em Leeds se existisse integração entre o sistema de iluminação artificial e a luz natural suprida por janelas. Se a integração fosse complementada com fibras ópticas, a redução na emissão de dióxido de carbono seria de aproximadamente 138 kg/m² por ano. A redução de emissão de dióxido de sulfúrio seria de 1,02 kg/m² por ano e poderia ser incrementada para 1,15 kg/m² por ano se fibras ópticas fossem usadas.

Conclusões

O uso dos FLDs para avaliar os potenciais de economia de energia em iluminação mostrou-se adequado apesar de se considerarem níveis de iluminância externa constantes e o céu padrão da CIE, que subestima os níveis de iluminação interna. Mostrou-se que a integração da

iluminação natural com o sistema de iluminação artificial poderia promover significativa economia de energia em iluminação devido não apenas aos altos níveis de iluminação próximos da janela, mas também à iluminação natural que atinge a superfície de trabalho no fundo das salas – uma contribuição normalmente desprezada.

Em termos de tamanhos de ambientes, mostrou-se que salas maiores apresentam um menor potencial de economia de energia em iluminação por meio do aproveitamento da luz natural que chega à superfície de trabalho pelas janelas. Em termos de geometria, salas com menor largura e maior profundidade também apresentam menor potencial de economia de energia em iluminação. Portanto, observou-se que tais salas são as que apresentam maior potencial de economia de energia quando fibras ópticas são usadas para transportar luz natural para as superfícies mais afastadas da janela.

Através das simulações computacionais para se determinar a Área Ideal de Janela para dez tamanhos de salas e cinco geometrias em sete cidades no Brasil e uma no Reino Unido, chegou-se às seguintes conclusões:

- (a) a Área Ideal de Janela tende a ser maior nas orientações cujo consumo de energia é menor e nas salas com maiores dimensões e menor largura;
- (b) salas com menor largura e maior profundidade apresentam menor consumo de energia. Isto mostra que salas com largura maior, como normalmente recomendado em guias e livros de iluminação natural para garantir um melhor aproveitamento da iluminação natural, não são as recomendadas para garantir menor consumo de energia;
- (c) quanto maior a sala, menor o consumo de energia por unidade de área;
- (d) a adoção de área de janela diferente da Área Ideal de Janela conduz a consumo de energia significativamente maior em salas pequenas. Em salas maiores, o incremento no consumo de energia não é significativo quando a área de janela difere da Área Ideal de Janela; e
- (e) usando a abordagem dos FLDs em salas com Área Ideal de Janela, mostrou-se que também existe um grande potencial de economia de energia em iluminação pela integração da luz natural com o sistema de iluminação artificial.

A pesquisa também mostrou que fibras ópticas podem contribuir para aumentar a economia de energia em iluminação e, portanto, para melhorar a eficiência energética em edificações. No entanto, a economia de energia em iluminação é mais

significativa quando a luz natural é admitida apenas pela janela. Assim, mediante uma análise econômica, verificou-se que o uso de fibras ópticas para transportar luz natural para o fundo das salas não representa um investimento tão atrativo quanto a integração do sistema de iluminação artificial com luz natural que provém apenas da janela.

Referências

- BANDALA, A. I. Importance of the Mexican lighting systems in commerce and services. In: RIGHT LIGHT THREE, EUROPEAN CONFERENCE ON ENERGY, EFFICIENT LIGHTING, 3., 1995, England. **Proceedings...** England, 1995. v. 1, p. 163-170.
- BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE). **BRE Digest 309**: Estimating daylight in buildings. Watford, England: Building Research Establishment Digest, 1986a. Part 1. 8 p.
- _____. **BRE Digest 310**: Estimating daylight in buildings. Watford, England: Building Research Establishment Digest, 1986b. Part 2. 8 p.
- BRITISH STANDARD (BS). **BS 8206-2**: Lighting for buildings. Code of practice for daylighting. London, 1992. Part 2. 36 p.
- CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS (CIBSE). **Daylighting and window design**. London, 1999. 91 p.
- ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). **Energy end-use intensities in commercial buildings**. Washington: Department of Energy, 1994.
- GELLER, H. S. **Efficient electricity use: a development strategy for Brazil**. Washington: American Council for an Energy-Efficient Economy, 1990. 164 p.
- GHISI, E. **The use of fibre optics on energy efficient lighting in buildings**. 2002. 295 f. Doctoral thesis - School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, 2002. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/>>. Acesso em: 20 abr. 2004.
- GHISI, E.; TINKER, J. A. Metodologia de avaliação do potencial de economia de energia em sistemas de iluminação através da utilização de fibras ópticas. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 3., e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E

DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 7., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ENCAC, COTEDI, 2003. p. 984-994. 1 CD-ROM.

_____. Optimising energy consumption in offices as a function of window area and room size. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 7., 2001, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: IBPSA, 2001. v. 2, p. 1307-1314.

HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Daylighting**. London: Heinemann, 1966. 606 p.

KOREAN NATIONAL TEAM. **New lighting systems**. Netherlands, Newsletter: CADDET Energy Efficiency, Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, 1996.

LANCASHIRE, D. S.; FOX, A. E. Lighting: the way to building efficiency. **Consulting-Specifying Engineer**, p. 34-36, Jan. 1996.

LITTLEFAIR, P. J. Modeling daylight illuminances in building environmental performance analysis. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, New York, p. 25-34, Summer. 1992.

MIN, G. F.; MILLS, E.; ZHANG, Q. Energy-efficient lighting in China: problems and prospects.

In: RIGHT LIGHT THREE, EUROPEAN CONFERENCE ON ENERGY EFFICIENT LIGHTING, 3., 1995, England. **Proceedings...** England, 1995. v. 1, p. 261-268.

PROGRAMA NACIONAL DE COMBATE AO DESPERDÍCIO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). **Manual de conservação de energia elétrica em prédios públicos e comerciais**. 3. ed. 1993. 20 p.

SLIEPENBEEK, W.; VAN BROEKHOVEN, L. Evaluation of stimev, the all-Dutch utility sponsored lighting rebate programs. In: RIGHT LIGHT THREE, EUROPEAN CONFERENCE ON ENERGY EFFICIENT LIGHTING, 3., 1995, England. **Proceedings...** England, 1995. v. 1, p. 247-254.

TREGENZA, P. R. The daylight factor and actual illuminance ratios. **Lighting Research and Technology**, Great Britain, v. 12, n. 2, p. 64-68, 1980.

TREGENZA, P.; LOE, D. **The design of lighting**. London: E & FN Spon, 1998. 164 p.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos que permitiu o desenvolvimento desta pesquisa; ao LabEEE/UFSC, pelos dados climáticos das cidades brasileiras; e ao British Atmospheric Data Centre, pelos dados climáticos de Leeds.