

GHANDI ESCAJADILLO TOLLEDO E ALEXANDRE VIEIRA PELEGRINI

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

Ghandi Escajadillo Toledo é graduado em Arquitetura - Universidad Nacional Federico Villarreal (2010). Tem experiência na área de Arquitetura e Urbanismo. Atualmente é Mestranda em Design pela Universidade Federal do Paraná, atuando na área de design e energia. Atua como colaboradora externa no IVUDS (Instituto de Habitação, Urbanismo e Desenvolvimento Sustentável) da Universidade Ricardo Palma do Peru.

E-mail: getpadesign500@gmail.com.

Alexandre Vieira Pelegrini é Ph.D. em Design Research (com pesquisa na área de energia solar e sistemas de iluminação natural) pela Brunel University/School of Engineering and Design (Londres, Reino Unido, 2010), Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Paraná (Curitiba/PR, 2004), Bacharel em Desenho Industrial pela Universidade do Estado de Santa Catarina (Florianópolis/SC, 2001). Atualmente é Professor e pesquisador no Departamento Acadêmico de Desenho Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

E-mail: avpelegrini@gmail.com.

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

Resumo

O consumo de energia destinada para a iluminação elétrica no Brasil vem crescendo significativamente ao longo dos últimos anos. Neste panorama, os dutos de luz solar, conhecidos como sistemas avançados de iluminação natural, podem contribuir com a redução do consumo de energia gasta em iluminação nas edificações. Este artigo tem como objetivo avaliar o percentual de aproveitamento de luz natural (PALN) e fazer uma estimativa do potencial de redução de consumo de energia elétrica ao longo do ano em ambientes integrados com dutos solares e janelas mediante a simulação computacional. A título demonstrativo, as simulações foram efetuadas para as latitudes das cidades de Curitiba/PR e Recife/PE, localizadas respectivamente na Região Sul e na Região Nordeste do Brasil. A primeira fase abrangeu as simulações realizadas no software TropLUX para calcular e comparar os valores das iluminâncias para três tipos de céu e em quatro datas simuladas, as salas simuladas têm duas profundidades diferentes. Na segunda fase foi calculado o PALN e a estimativa de economia de energia gasta em iluminação gerada a partir do uso do tubo solar nos ambientes e datas simuladas. Os resultados mostram que podem se obter valores de PALN de 5 % até 37 %, a economia de energia calculada varia entre 1800 watt-hora até 7200 watt-hora por mês. Os dutos solares analisados complementaram e incrementaram o nível de iluminação nas áreas, em que os sistemas convencionais de iluminação como as janelas não atingem a iluminação mínima requerida.

Palavras-chave: Economia de energia. Simulação computacional. Tubo Solar.

Abstract

The increase in energy consumption used in artificial lighting in Brazil represents a high percentage. In this panorama the solar tubes, advanced natural lighting systems, helps in contributing to reduce energy consumption spent on lighting in buildings. This study aims to calculate the percentage of use of natural lighting (PALN) and to estimate the potential for reducing electricity consumption throughout the year in environments with integrated solar tubes and windows by computer simulation. The simulations were performed for latitudes of the cities of Curitiba/PR and Recife/PE. The first phase covered the simulations in TropLUX software to calculate and compare the illuminance values for three types of sky and four simulated dates, the simulated rooms having different depths. In the second phase it was calculated the PALN and the estimated energy savings spent on lighting generated from the use of solar tube in simulated environments and dates. The results show that PALN values vary from 5 % to 37 %, the energy savings varies from 1800 watt hours to 7200 watt hours per month. The solar light pipe simulated complemented and increased lighting levels in areas where conventional lighting system such as windows do not reach the minimum lighting required.

Keywords: Computer simulation. Energy saving. Solar tube.,

Introdução

No Brasil, a demanda por energia elétrica vem aumentando significativamente devido ao crescimento econômico, a inclusão social e o incremento no consumo de serviços e produtos (EPE, 2012). Neste contexto, observa-se que a demanda por eletricidade no setor residencial corresponde a aproximadamente 23,6% do total, sendo a iluminação elétrica responsável por uma parcela significativa do consumo (MME, 2013).

Nota-se que para atender a este crescimento serão necessários grandes investimentos na geração de energia, observando-se projetos que não gerem impactos ambientais negativos e que não resultem no aumento dos índices de poluição (EPE, 2012).

Neste contexto, o uso de sistemas avançados de iluminação, como os tubos solares, pode contribuir na redução do consumo de energia gasta em iluminação, como também mitigar as emissões de carbono associadas ao uso da iluminação artificial e melhorar significativamente o nível da iluminação natural no interior das edificações (KOMAR e DARULA, 2012; KIM e KIM, 2010).

Os dutos de luz solar são tecnologias avançadas de iluminação natural que utilizam uma fonte de energia renovável: estes dispositivos lineares captam a luz solar e luz do céu por meio de um coletor e transportam esta luz ao interior dos edifícios através de um tubo altamente reflexivo. A luz natural é então distribuída ao interior do ambiente mediante um difusor de luz localizado no teto (AL-MARWAE e CARTER, 2006; MOHELNIKOVA, 2009).

Estes sistemas potencializam e complementam a iluminação natural ao interior dos ambientes, sobretudo, iluminando as partes mais distantes da janela que precisam de iluminação de forma mais controlada, em que a iluminação elétrica é normalmente requerida em horários diurnos (LI et al, 2010).

No âmbito internacional, diversos estudos comprovam o potencial de redução do consumo energético e payback a partir do uso de dutos de luz solar. Destaca-se que a maioria das pesquisas internacionais avalia o impacto do uso de sistemas de iluminação natural em edificações de uso comercial como escritórios, escolas e centros de compras (KIM e KIM, 2010; LI et al, 2010; MAYHOUB e CARTER, 2012).

Li et al (2010) desenvolveram um estudo em Hong Kong em que 10 tubos de luz foram instalados no teto de um corredor de um edifício não comercial. Os resultados da análise mostraram que o sistema ao estar integrado com controles de iluminação adequados pode reduzir substancialmente o consumo de energia de iluminação. Segundo os autores, a economia de energia depende diretamente da disponibilidade da luz externa do céu. Usando controles *on-off* e *dimmers*, o gasto de energia representou respectivamente 54% e 42% da energia consumida sem nenhum tubo instalado (LI et al, 2010).

Mayhoub e Carter (2011) analisaram o payback de diversos sistemas híbridos

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

avançados de iluminação para edifícios de escritórios; foi evidenciado que os dutos de luz apresentaram baixos custos de investimento, devido a possuir uma tecnologia simples que utiliza baixas concentrações de luz solar. O payback calculado, em relação aos preços de energia elétrica da Europa, foi de aproximadamente entre 4 a 6 anos (MAYHOUB e CARTER, 2011).

Mayhoub e Carter (2012) realizaram um estudo para comparar a economia de energia proporcionada pelo emprego de sistemas híbridos de iluminação natural em diferentes localidades do mundo. De acordo com esses autores, os sistemas de dutos de luz solar apresentaram um melhor desempenho em relação ao custo-benefício, apesar de não possuírem uma tecnologia sofisticada. A economia gerada em edifícios não comerciais e em latitudes localizadas mais próximas da Linha do Equador foi de até 55% (MAYHOUB e CARTER, 2012).

No âmbito brasileiro, apesar das condições climáticas favoráveis, existem poucas pesquisas sobre os tubos solares e os diferentes benefícios obtidos a partir do uso destes, por exemplo, o potencial de redução do consumo de energia elétrica.

Soto (2010) avaliou a capacidade de admissão e distribuição de luz natural mediante o uso de dutos de luz solar para melhorar o nível de iluminação em Habitações de Interesse Social (HIS), foi utilizada para este propósito a simulação computacional. Os modelos simulados em que foram observados níveis suficientes de iluminâncias para atividades domésticas geraram uma economia de energia utilizada para iluminação de 38 %.

No Brasil, uma das poucas pesquisas realizadas sobre a relação custo-benefício e a economia de energia pós-instalação de dutos de luz solar foi desenvolvida pela Light (Companhia de Energia Elétrica) em 2011, através do Programa de Eficiência Energética (PEE). O estudo foi desenvolvido nas instalações do Ginásio de Esportes Ilha de São João, da Prefeitura de Volta Redonda, município do Estado do Rio de Janeiro (LIGHT, 2011). Neste ginásio foram instalados dutos de luz em conjunto com luminárias mais eficientes para modernizar e melhorar a iluminação. Como principal resultado, obteve-se uma redução no consumo de energia 86% menor de energia destinada à iluminação. Neste caso, o payback será obtido em aproximadamente cinco anos a partir da data de instalação (LIGHT, 2011).

Neste contexto, e tendo como base o breve referencial teórico apresentado, pode-se observar uma área ainda pouco explorada sobre a economia de energia que pode ser atingida no setor residencial com o uso de dutos de luz solar. No Brasil, ao não estar difundido amplamente o uso destes sistemas, acredita-se ser importante as pesquisas que mostrem os benefícios econômicos desta tecnologia.

Visando contribuir para o campo da iluminação natural no Brasil, este trabalho tem como objetivo avaliar o percentual de aproveitamento de luz natural (PALN) gerado pelo emprego de um duto de luz solar em ambientes simulados. Busca-se, também, conduzir uma estimativa do potencial de redução de consumo de energia elétrica ao longo do ano em ambientes providos de um duto solar e uma janela, mediante o uso da simulação computacional.

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

Método

Este trabalho analisa o percentual de aproveitamento de luz natural mediante o uso integrado de dutos solares e janelas, como também a economia de energia gerada com o uso dos dutos solares. Esta análise, realizada em duas fases, é obtida por meio da simulação computacional no programa Troplux.

A primeira fase abrange as simulações realizadas no software Troplux para calcular e comparar os valores das iluminâncias para cada tipo de céu e nas quatro datas simuladas. Neste caso a simulação foi efetuada em ambientes com duas geometrias diferentes e para as latitudes das cidades de Curitiba/PR e Recife/RE, escolhidas a título demonstrativo para esta pesquisa. Nota-se que as configurações dos tipos de céu nas simulações foram especificadas conforme as recomendações da Comissão Internacional de Iluminação (CIE, 2003).

Na segunda fase foi calculado, com base nas simulações realizadas, o PALN (percentual de aproveitamento de luz natural) e a estimativa de economia de energia (kWh) gasta em iluminação gerada a partir do uso do tubo solar nos ambientes e datas simuladas.

Análise das Iluminâncias internas nos ambientes dos modelos simulados

Para conhecer os valores das iluminâncias internas nos ambientes simulados, foi utilizado o software Troplux. A simulação efetuada foi para as cidades de Curitiba/PR (latitude $-25^{\circ}24'$) e Recife/PE (latitude $-08^{\circ}06'$).

O azimute com respeito ao eixo x corresponde a 0° para os quatro ambientes simulados, tanto de Curitiba/PR como de Recife/PE. A janela da sala está orientada ao norte, como também o coletor do duto de luz solar.

Configuraram-se quatro salas com diferentes profundidades, a primeira sala tem dimensões (3.80 x 2.40 x 2.60) m, a segunda sala tem como dimensões (4.80 x 2.40 x 2.60) m, esta segunda sala possui uma proporção geométrica entre a largura e a profundidade de 1:2. A terceira e a quarta salas têm as mesmas dimensões das anteriores, mas com um tubo solar configurado para cada caso. Todas as salas possuem a mesma localização da janela, como também as mesmas dimensões. O percentual de janela na fachada (PJF) é de 30 %. A primeira sala tem as reais dimensões do ambiente (3.80 x 2.40 x 2.60) m.

Para a simulação foi considerada a refletância do piso igual a 0,45, o teto tem refletância difusa de 0.7 e as paredes têm 0.7 de refletância difusa, para a janela a transmitância considerada é de 0.88. As refletâncias e transmitâncias empregadas são os mais próximos aos materiais utilizados na casa de teste real.

O tubo tem as seguintes características geométricas: a relação diâmetro/comprimento é de 1:3, o comprimento do tubo é de 75 cm e o diâmetro do

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

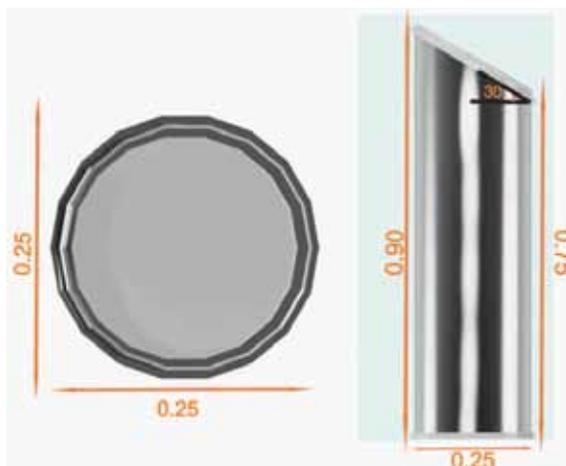
Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

coletor e difusor é de 25 cm, a parte superior do tubo, onde está o coletor possui um corte de 30° orientado ao norte, para otimizar a captação de luz (Figura 1).

Figura 1

Características geométricas do tubo usado nas simulações.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

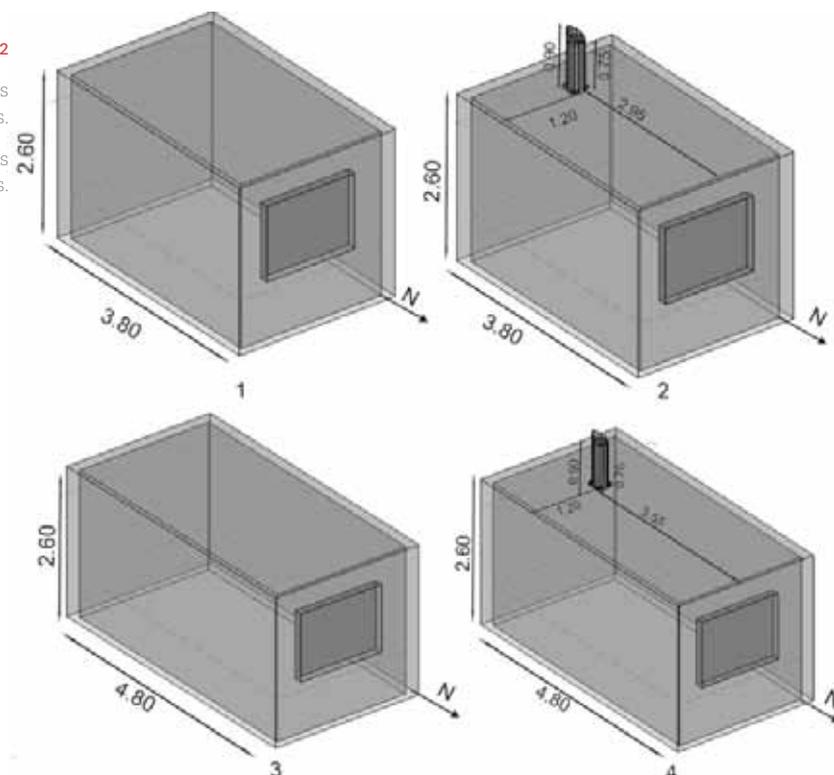


Como características dos materiais foi definido policarbonato para o coletor e difusor, com transmitância de 0.9. Para o revestimento interno do tubo foi considerado uma refletância de 0.98. As dimensões, características geométricas e orientação das quatro salas simuladas estão ilustradas na Figura 2.

Figura 2

Características geométricas das salas simuladas.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores.



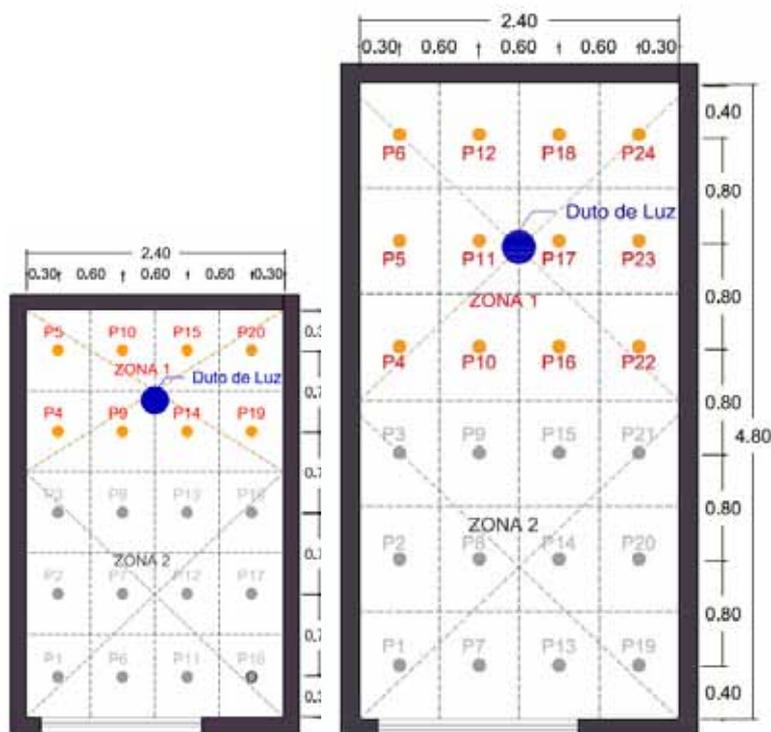
Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

O eixo central do tubo (Figura 2) está localizado a 2.95 m de distância da janela com relação ao eixo y e a 1.2 m de distância com relação à janela no eixo x. Para a sala 4 (Figura 2) o eixo central está a 3.55 m da janela com relação ao eixo y e a 1.2 m de distância da janela.

As simulações foram efetuadas para os 4 modelos de sala (Figura 2) e para comparar as salas com duto solar e sem duto solar e assim conhecer qual seria o incremento das iluminâncias ao usar o tubo solar nos ambientes simulados. Para esta análise definiram-se duas zonas nas salas, para supor que na realidade cada zona teria seu próprio controle de iluminação artificial, em base a estas duas zonas foram separados os pontos da malha de análise de acordo com a profundidade dos ambientes nas duas tipologias das salas (Figura 3), observam-se os mesmos pontos de análise nas salas sem o duto de luz solar. O plano de trabalho está localizado a 75 cm de altura em relação ao nível do piso.

Figura 3
Pontos da malha de análise pertencentes a cada zona dos ambientes para as salas simuladas.
Fonte: Elaborado pelos próprios autores.



As simulações foram realizadas no período entre 7h e 17h, hora solar, e para quatro datas, nos solstícios de inverno e verão e nos equinócio de outono e primavera, estas datas correspondentes ao hemisfério Sul, com a finalidade de determinar a eficácia do sistema ao longo do ano. Foram considerados três tipos de céu, definidos pelos números 5, 10 e 15, padronizados pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE, 2003) e que estão disponíveis no software TropiLux. O céu tipo 5 corresponde ao céu encoberto, o céu tipo 10 corresponde ao céu parcialmente nublado e o céu 15 ao céu claro com luz solar direta. A

consideração destes três tipos de céus é suficiente para determinar as condições de luz natural num determinado clima (CABÚS, 2005; CIE, 2003).

Considerou-se o nível de iluminação natural de 500 lux como o valor mínimo de iluminação, obedecendo a norma técnica brasileira NBR 8995, para as tarefas que correspondem às atividades de leitura. Com base nestas simulações serão comparadas as iluminâncias internas nas duas situações: os ambientes com o duto de luz e sem o duto de luz. Para saber em quais horários com o uso do duto de luz solar, pode-se atingir a iluminância mínima requerida, que não é alcançado no ambiente sem o duto de luz solar.

Cálculo do Percentual de Aproveitamento de luz Natural e cálculo de economia de energia nos ambientes simulados

Para efetuar o cálculo do consumo de energia em iluminação artificial do programa Troplux, devido a que o software trabalha com simulação estática da iluminação natural, utilizou-se o Percentual de Aproveitamento da Luz Natural (PALN), método de cálculo desenvolvido por Souza (2003). O PALN é dado através do período em que a luz natural é suficiente para atender as necessidades da tarefa a ser realizada no local, ou para complementar a luz artificial.

O programa Troplux não utiliza um arquivo climático, sendo as simulações são definidas para cada tipo de céu (RAMOS e GHISI, 2008). Para este cálculo foram utilizadas as simulações para cada período do ano (solstícios e equinócios) e para três tipos de céu (encoberto, claro e intermediário). O PALN serve para estabelecer o período no qual a luz natural poderá substituir ou complementar a luz artificial (Equação 1).

$$PALN = PALN_s + PALN_c$$

Onde:

PALN é o percentual de aproveitamento da luz natural [%];

PALNS é o percentual de aproveitamento da luz natural por substituição da iluminação artificial [%];

PALNC é o percentual de aproveitamento da luz natural por complementação da iluminação artificial [%].

Para este caso será utilizado o PALN por substituição, o fator de economia dependerá da relação que existe entre o número de horas em que a iluminância da luz natural é maior que a iluminância de projeto pelo número total de horas (n) de utilização do ambiente. Estes parâmetros estão na equação 2.

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

Onde:

E_{in} é a iluminância média proporcionada pela luz natural;

E_p é a iluminância do projeto e n é o número de horas analisadas. Para calcular o percentual de aproveitamento da luz para cada horário e feita a ponderação de acordo com a probabilidade de ocorrência de cada tipo de céu para cada uma das estações do ano de acordo com a equação 3:

Onde:

PALNP é o percentual de aproveitamento da luz natural ponderado [%];

PALNCC é o percentual de aproveitamento da luz natural com céu claro [%];

PALNCP é o percentual de aproveitamento da luz natural com céu parcialmente encoberto [%];

PALNCE é o percentual de aproveitamento da luz natural com céu encoberto [%];

P_{cc} é a probabilidade de ocorrência de céu claro [adimensional];

P_{cp} é a probabilidade de ocorrência de céu parcialmente encoberto [adimensional];

P_{ce} é a probabilidade de ocorrência de céu encoberto [adimensional].

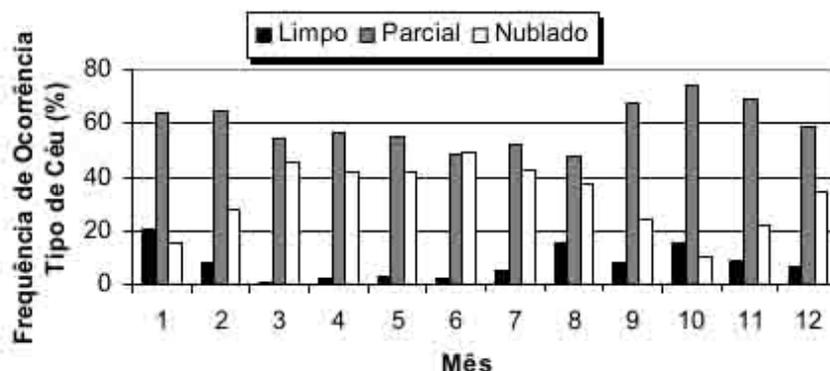
Para conhecer a probabilidade de ocorrência de céu, no caso do ambiente simulado do Recife/PE, foi utilizada a frequência de ocorrência do tipo de céu de acordo com os dados do arquivo climático TRY de Recife/PE (Figura 4), analisado por Carlo, Pereira e Lamberts (2004). O ano climático de Referência ou *Test Reference Year* (TRY), está formado de um arquivo com dados climáticos horários de um ano típico usados por softwares de simulação do desempenho (PEREIRA et al, 2004).

Figura 4

Modelo de frequência de ocorrência do tipo de céu de acordo com os dados do

TRY para a cidade de Recife/PE.

Fonte: Carlo, Pereira e Lamberts (2004).



Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

No caso do ambiente simulado de Curitiba/PR, foram considerados os dados do arquivo climático TRY (*Test Reference Year*) para a cidade de Curitiba/PR, para os quatro meses correspondentes às simulações efetuadas. Esta frequência de tipo de céu para os quatro meses estão resumidos na Figura 5.

Figura 5
Frequência de Ocorrência de Tipo de céu para Curitiba.
Fonte: LABEEE (2013).

Mês do Ano	Céu Coberto	Céu Parcialmente Coberto	Céu claro
Março	51 %	36%	13%
Junho	53%	15%	32%
Setembro	55 %	19%	26%
Dezembro	49%	43%	8%

Em base à análise final de cada percentual de aproveitamento de luz para todas as simulações, conseguiu-se calcular uma estimativa de quantos watts-horas podem se economizar ao longo do ano para cada uma das situações simuladas.

Destaca-se que não foi calculado o PALN geral, isto é, do percentual usando a janela e o duto de luz. Estes resultados pertencem ao PALN obtido com o acréscimo de luz a partir do uso do duto de luz solar. Conforme explicado, como iluminação mínima é considerada 500 lux, de acordo com a norma técnica brasileira NBR 8995 (ABNT, 2013).

Análise dos resultados

Análise das Iluminâncias internas nos ambientes dos modelos simulados

Para o caso da zona 2 foi atingido o valor mínimo de iluminâncias em todos os casos, tanto na cidade de Curitiba/PR como de Recife/PE, este fato aconteceu por se achar a zona 2 (Figura 3), mais perto da janela nos ambientes simulados. Nesta zona os valores das iluminâncias são maiores também superando a iluminação exigida pela norma. Os resultados a ser mostrados a continuação pertencem na sua totalidade a zona 1 (Figura 3), que corresponde à zona mais afastada da janela em todos os casos.

Para o caso da zona 1 (Figura 3), a Figura 6 mostra os resultados para março, em que estão realçados, em azul, os casos em que em comparação com somente a sala e a janela conseguiu-se superar os 500 lux, o mínimo nível de iluminação exigido pela norma técnica brasileira NBR 8995 para este caso, nos horários simulados. Para o céu 10, nas quatro salas simuladas, na zona 1 não foi necessária a ajuda das iluminâncias entregues pelo tubo solar para superar o valor mínimo de 500 lux.

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

Figura 6

Iluminâncias obtidas para o equinócio de outono nas quatro salas simuladas.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Sala	Curitiba Modelo 2.4 x 3.8 (m)		Curitiba Modelo 2.4 x 4.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 3.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 4.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 4.8 (m)	
Tipo de Céu	Céu 5 (Coberto)								Céu 15 (claro)	
Horas	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela
Unidade: Lux										
9:00	340	511	286	331	372	557	366	443	975	1,021
10:00	414	624	349	404	454	680	447	540	750	1,007
11:00	462	695	389	449	495	757	493	601	377	1,496
12:00	477	719	402	503	523	784	515	622	362	1,399
13:00	462	695	389	449	495	757	493	601	526	1,313
14:00	414	624	349	404	454	680	447	540	825	886
15:00	340	511	286	331	372	557	366	443	1,331	1,071

Para o mês de junho, observa-se o maior número de horas em que o tubo solar contribui a superar as iluminâncias mínimas em comparação com as salas que não tem tubos. Neste caso para o céu 5 e a sala de maior profundidade no ambiente simulado de Curitiba/PR, não se conseguiu superar o valor mínimo de 500 lux em nenhum dos horários.

Para a sala de maior profundidade em Recife/PE, neste tipo de céu, a iluminação mínima já é atingida sem o duto de luz solar. Acontece este mesmo fato no céu 15, para a sala de menor profundidade em Recife/PE. A Figura 7 e a Figura 8 mostram os resultados para esta data, em que estão realçados, em azul, os casos em que em comparação com somente a sala e a janela conseguiu-se superar os 500 lux.

Figura 7

Iluminâncias obtidas para o solstício de Inverno nas quatro salas simuladas, céu 5 e céu 10.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Sala	Curitiba Modelo 2.4 x 3.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 3.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 4.8 (m)		Curitiba Modelo 2.4 x 3.8 (m)		Curitiba Modelo 2.4 x 4.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 3.8 (m)	
Tipo de Céu	Céu 5 (Coberto)						Céu 10 (Semicoberto)					
Horas	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela
Unidade: Lux												
8:00	135	203	216	317	212	258	409	551	295	355	731	1,073
9:00	224	338	315	462	308	375	621	915	490	545	1,085	1,396
10:00	293	441	391	573	382	465	759	1,098	622	669	1,159	1,567
11:00	336	506	438	642	429	522	777	1,157	608	730	985	1,496
12:00	351	528	454	666	445	541	800	1,201	645	818	1,014	1,548
13:00	336	506	438	642	429	522	867	1,299	687	864	1,084	1,653
14:00	293	441	391	573	382	465	885	1,331	692	898	1,112	1,682
16:00	135	203	216	317	212	258	605	914	463	670	874	1,281
17:00	30	46	101	149	99	121	140	207	107	154	463	666

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

Figura 8

Iluminâncias obtidas para o solstício de Inverno nas quatro salas simuladas, céu 15.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Sala	Curitiba Modelo 2.4 x 3.8 (m)		Curitiba Modelo 2.4 x 4.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 4.8 (m)	
Tipo de Céu	Céu 15 (Claro)					
Horas	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela
Unidade: Lux						
8:00	850	1,379	559	767	1,613	1,205
9:00	848	1,220	599	718	1,373	831
10:00	756	1,023	592	638	740	862
11:00	540	791	350	502	348	657
12:00	455	682	355	506	357	668
13:00	550	813	429	571	489	671
14:00	652	970	513	578	757	773
16:00	951	1,418	784	827	1,543	1,053
17:00	618	894	518	536	1,554	1,047

No caso do mês de setembro, para o céu 10, a iluminação mínima já é atingida sem o duto de solar em todas as salas simuladas. Para o céu 15 acontece o mesmo, com a exceção da sala de maior profundidade na cidade de Recife/PE. A maior eficiência do duto de luz solar é para a sala de 3.8 m em Curitiba/PR. A Figura 9 apresenta os resultados para esta data, em que estão realçados, em azul, os casos onde em comparação com somente a sala e a janela conseguiu-se superar os 500 lux, iluminação mínima requerida.

Figura 9

Iluminâncias obtidas para o equinócio de primavera nas quatro salas simuladas.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Sala	Curitiba Modelo 2.4 x 3.8 (m)		Curitiba Modelo 2.4 x 4.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 3.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 4.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 4.8 (m)	
Tipo de Céu	Céu 5								Céu 15	
Horas	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela
Unidade: Lux										
9:00	338	523	284	328	374	548	366	445	1,037	1,011
10:00	413	622	347	401	456	669	447	544	681	1,000
11:00	460	693	386	447	492	745	497	605	393	1,480
12:00	476	717	400	502	526	771	515	626	362	1,385
13:00	460	693	386	447	492	745	497	605	490	1,301
14:00	413	622	347	401	456	669	447	544	821	884
15:00	338	523	284	328	374	548	366	445	1,323	1,069

Dezembro é a data com os níveis mais altos de iluminâncias, por esta razão, sem a contribuição na iluminação geral, com o duto de luz, a iluminação mínima requerida já é atingida na maioria de horários. Para o céu 10 acontece o anteriormente mencionado em todos os casos, ao igual que no céu 15, com a exceção da sala de maior profundidade em Recife/PE. A Figura 10 exhibe os resultados para esta data, em que estão realçados, em azul, os horários em que se conseguiu superar os 500 lux nos horários simulados.

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

Figura 10

Iluminâncias obtidas para o solstício de verão nas quatro salas simuladas.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Sala	Curitiba Modelo 2.4 x 3.8 (m)		Curitiba Modelo 2.4 x 4.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 3.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 4.8 (m)		Recife Modelo 2.4 x 4.8 (m)	
Tipo de Céu	Céu 5								Céu 15	
Horas	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela	Janela	Tubo e janela
Unidade: Lux										
9:00	402	606	338	393	374	548	366	445	827	906
10:00	471	709	395	463	449	659	440	535	705	969
11:00	514	775	432	506	497	729	486	592	332	662
12:00	529	797	444	521	513	753	496	611	352	1,748
13:00	514	775	432	506	497	729	486	592	485	703
14:00	471	709	395	463	449	659	440	535	709	778
15:00	402	606	338	393	374	548	366	445	1,037	898

Cálculo do Percentual de Aproveitamento de luz Natural e cálculo de economia de energia nos ambientes simulados

Com base aos resultados anteriormente obtidos foram calculados os percentuais de aproveitamento de luz natural, usando o método de Souza (2003), para cada tipo de sala e nas datas simuladas. Para esta análise também foi utilizada a frequência de ocorrência de céu das cidades de Curitiba/PR e Recife/PE. Estes resultados estão resumidos na Figura 11 com um valor aproximado de economia de Kwh para cada mês simulado.

Para o cálculo de economia de energia foi considerada como referência uma lâmpada de 60 watts em todos os casos. Os menores resultados foram simulados para o duto solar instalado na sala de Curitiba/PR com 4.8 metros de profundidade nos meses de março e setembro. O mês de junho apresenta neste caso, o máximo percentual, obtendo um PALN de 18%, o que poderia gerar uma economia de aproximadamente 3600 watt-hora para este mês (Figura 11).

Figura 11

Percentual de aproveitamento de luz natural e cálculo de economia de energia nos ambientes simulados.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Mês Modelo da sala	Março		Junho		Setembro		Dezembro	
	PALN	KWh (mensal)	PALN	KWh (mensal)	PALN	KWh (mensal)	PALN	KWh (mensal)
Curitiba Modelo 2.4 x 3.8m	34%	7.2	12%	1.8	37%	7.2	18%	3.6
Curitiba Modelo 2.4 x 4.8m	5%	1.8	18%	3.6	5%	1.8	13%	1.8
Recife Modelo 2.4 x 3.8m	25%	5.4	22%	3.6	14%	1.8	20%	3.6
Recife Modelo 2.4 x 4.8m	17%	3.6	15%	3.6	11%	1.8	11%	1.8

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

A simulação do duto solar instalado na sala de 4.8 m de profundidade da cidade de Recife/PE foi o terceiro caso mais eficiente, chegando o PALN a 17 % no mês de março, com uma redução de consumo de até 3600 watts-horas para o mês de junho. A simulação do duto solar instalado na sala de 3.8 m de profundidade para a cidade de Recife/PE foi o segundo caso mais eficiente para o aproveitamento de luz natural e redução do consumo de energia, atingindo um PALN de 25 %, estimando uma economia de cerca de 5400 watts para o mês de março.

O caso mais eficiente foi obtido para o duto de luz solar instalado na sala de 3.8 m de profundidade, simulado no contexto climático e de incidência solar da cidade de Curitiba/PR. Para o referido caso, o maior PALN registrado foi de 37 %, para o mês de setembro. Com base neste resultado, calculou-se a economia de aproximadamente 7200 watts-horas para este mês, a melhor eficiência obtida nas simulações.

Considerações Finais

Neste trabalho foi analisado o percentual de aproveitamento de luz e o potencial de economia de energia em ambientes com diferentes profundidades com dutos solares e janelas, para as latitudes de Recife/PE e Curitiba/PR. Ressalta-se, neste artigo, o fato da limitação nos parâmetros ambientais no momento das simulações: a orientação das salas, como também o percentual da janela na fachada contribuindo estes parâmetros nos resultados obtidos. O diâmetro do tubo é um fator determinante no desempenho do sistema, para este caso. O diâmetro considerado foi de 25 cm, para todos os casos, por se considerar este diâmetro suficiente para iluminar as áreas a serem utilizadas.

Os melhores resultados correspondem às salas com menos profundidade, por estar as zonas analisadas mais próximas da janela, e, portanto, recebem mais influência da incidência solar através desta abertura, em comparação com as zonas que estão mais afastadas da janela. O maior percentual de aproveitamento de luz, como redução de consumo de watts foi para a sala com menor profundidade na cidade de Curitiba/PR.

Observa-se que os dutos solares podem aumentar o nível de iluminação, principalmente a iluminação nas zonas mais afastadas das janelas, que é o principal objetivo da instalação dos dutos de luz solar, complementar a iluminação nas áreas, em que a iluminação com sistemas convencionais de iluminação como as janelas não atingem este objetivo.

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

Para o caso do potencial de redução de consumo de energia elétrica, o caso analisado nesta pesquisa foi obtido uma redução considerável chegando ao melhor dos casos a uma redução de até 7200 watts-horas por mês e um percentual de aproveitamento de luz natural de 37 %, embora estes resultados dependam das condições ambientais configuradas nas simulações e da margem de erro no cálculo dos softwares de simulação.

Para futuros trabalhos seria recomendável conduzir simulações com outras geometrias de salas e outros parâmetros ambientais, como diferentes latitudes e orientações das salas, como também simular outras geometrias de dutos de luz solar, variando o diâmetro e o comprimento dos mesmos, visando gerar melhores resultados.

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 8995-ISSO-CIE – Iluminação de Ambientes de Trabalho**, Rio de Janeiro, 2013.

AL-MARWAEI, M; CARTER, D. Tubular Guidance Systems for Daylight: Achieved and Predicted Installation Performances. *Applied Energy*, v. 83, n. 7, p. 744-788, jul., 2006.

CARLO, J.; PEREIRA, F. O. R; LAMBERT, R. Iluminação natural para redução do consumo de Energia de edificações de escritório aplicando Propostas de eficiência energética para o código de Obras do Recife. *Anais... In: I Conferência latino-americana de construção sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, São Paulo, ENTAC, 2004.

CIE – Commission Internationale de l’Eclairage: **Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky**. CIE S 011/E:2003, ISO 15469:2003(E), Viena, 2003.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Projeção de Demanda de Energia Elétrica para os próximos 10 anos (2013 – 2022)*. 2012. Disponível em: http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20130117_1.pdf. Acesso em: 7 jan. 2013.

KIM G.; KIM J. Overview and New Developments in Optical Daylighting Systems for Building a Healthy Indoor Environment. *Building and Environment*, v. 45, n. 2, p. 256–269, feb., 2010.

KOMAR L.; DARULA, S. Determination of the Light Tube Efficiency for Selected Overcast Sky Types. *Solar Energy*, v. 86, n. 1, p. 157-163, jan., 2012.

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climático TRY de Curitiba**. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>. Acesso em: 28 fev. 2013.

Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar.

Computer simulation applied in the assessment of the percentage of use of natural light generated by a solar light pipe.

LI, D. H. W. et al. An Analysis of Light-pipe System via Full-scale Measurements. *Applied Energy*, v. 87, n.1, p. 799-805, mar. 2010.

LIGHT. Revista de eficiência energética da Light. *Luz Natural com Tecnologia Inovadora*, n. 2, ago, 2011. Disponível em: <<http://www.light.com.br/web/institucional/eficiencia/pdf/revista-eficienciaenergetica2.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2012.

MAYHOUB, M.; CARTER D. The Costs and Benefits of Using Daylight Guidance to Light Office Buildings. *Building and Environment*, v. 46, n. 3, p. 698-710, mar., 2011.

_____. A Feasibility Study for Hybrid Lighting Systems. *Building and Environment*, v. 53, p. 83-94, jul., 2012.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2012**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2013.

MOHELNIKOVA, J. Tubular Light Guide Evaluation. *Building and Environment*, v. 44, n. 10, p. 2193-2200, oct., 2009.

PEREIRA, I.; ALVES, T.; PINHEIRO, R.; ASSIS, E. Metodologia de tratamento de dados climáticos para inserção em softwares de simulação energética de edifícios. **Anais...** In: I Conferência latino-americana de construção sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo, ENTAC, 2004.

RAMOS, G.; GHISI, E. Comparação de iluminâncias internas e externas obtidas por meio de simulação computacional. In: ENTAC 2008 – XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construtivo, 2008, **Anais...** Fortaleza. ENTAC, 2008.

SOUZA, M. B. **Potencialidade de aproveitamento da luz Natural através da utilização de Sistemas automáticos de controle para Economia de energia elétrica**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). UFSC, Florianópolis, 2003.

SOTO, S. F. J. **Avaliação do Desempenho Luminoso de Duto de Luz: Estudo da Implementação em Ambientes Padrões de Habitações Populares em Três Latitudes**. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2010.