

Análise do Desempenho lumínico de um duto de luz solar: avaliação com diferentes dispositivos de controle de luz, na cidade de CuritibaGandhi Escajadillo Toledo¹ e Alexandre Vieira Pelegrini²¹Universidade Federal do Paraná – UFPR²Universidade Federal Tecnológica do Paraná - UTFPR

Resumo: Os dutos de luz solar possibilitam a redução do consumo de energia elétrica associada à iluminação artificial, contribuindo também para aumentar o conforto lumínico nos ambientes internos através da aplicação estratégica de uma fonte de energia natural e abundante: a luz solar. Apesar dos benefícios destes sistemas serem amplamente discutidos na literatura técnica internacional, no Brasil ainda são poucos os estudos que investigam o desempenho destas tecnologias dentro do contexto nacional. O presente artigo tem como objetivo analisar o desempenho de um protótipo de duto de luz solar, com diferentes dispositivos de controle de luz, numa casa de teste localizada na cidade de Curitiba-PR. Foi realizada esta análise em duas etapas: A comparação do desempenho lumínico de dois sistemas de difusão de luz e a análise do desempenho dos dispositivos de redirecionamento de luz. Os maiores acréscimos correspondem ao difusor claro, nos céus coberto e semicoberto nos pontos mais próximos ao tubo de luz solar, foi registrado um acréscimo de até 150% no nível de iluminâncias. Para o céu claro, este acréscimo não é tão elevado, porque a iluminação fornecida pela janela contribui com maiores valores de iluminâncias nos pontos afastados da janela. Entre os dois dispositivos de redirecionamento de luz propostos, o dispositivo que abrange a maior área do difusor é o caso mais eficiente. Esta eficiência é superior nos céus claro e semicoberto. O protótipo desenvolvido com todos os dispositivos de controle de luz apresenta um desempenho considerável.

Palavras-chave: duto de luz solar, desempenho lumínico, dispositivos de controle de luz

Lighting Performance Analysis of a light pipe: Evaluation with different lighting control devices in the city of Curitiba

Abstract: The light pipes allow the reduction of energy consumption associated with artificial lighting, and contribute to an increase in lighting comfort in indoors environments through the strategic application of a natural and abundant energy source: sunlight. Despite the benefits of these systems are widely discussed in the international technical literature, in Brazil there are few studies that investigate the performance of these technologies within the national context. This paper aims to analyze the performance of a light pipe prototype, with different light pipe control devices, installed in a test house located in the city of Curitiba/ PR, Brazil. This analysis was performed in two stages: A performance comparison of two lighting diffusion systems and the performance analysis of daylight redirection devices. The higher increases correspond to the clear diffuser, in covered and partially covered skies, for the closest points from the light pipe, it was recorded an increase of illuminances up to 150 %. For the clear sky, this increase is not high, because the lighting provided by the window contributes with higher illuminance values in the farthest points from the window. Between the two proposed daylight redirection devices, the device that covers the largest diffuser area is the most

efficient case. This efficiency is higher in clear and partially covered skies. The performance of this prototype equipped with all the lighting control devices is considerable.

Key words: light pipe, lighting performance, lighting control devices

Introdução

A demanda por energia elétrica no Brasil vem aumentando significativamente devido ao crescimento econômico, a inclusão social, e o incremento no consumo de serviços e produtos que demandam energia elétrica (MME, 2013). O consumo setorial de eletricidade residencial corresponde a 23,6% (EPE, 2012), e a iluminação elétrica representa uma significativa porcentagem dessa energia.

Para atender a esta crescente demanda serão necessários grandes investimentos na geração de energia, priorizando-se projetos e sistemas com baixo impacto ambiental negativo (EPE, 2012). Neste contexto, através do uso de sistemas avançados de iluminação natural, pode-se contribuir na redução do consumo de energia gasta em iluminação, como também mitigar as emissões de carbono associadas ao sistema de iluminação artificial e melhorar significativamente o nível de iluminação natural no interior das edificações (Kim e Kim 2010; Komar e Darula 2012).

Uma destas tecnologias avançadas de iluminação natural são dutos de luz solar. Diversos estudos têm comprovado que com os dutos de luz solar aumenta-se consideravelmente o nível de iluminação no ambiente interno, contribui-se significativamente na redução do uso da iluminação artificial em horário diurno; e gera-se uma iluminação interna mais agradável e produtiva (Mohelnikova, 2009; Soto, 2010).

Os dutos de luz solar são tecnologias 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, esta luz é distribuída ao interior do ambiente mediante um difusor localizado no teto (Al-Marwae e Carter, 2006). Estes sistemas complementam a iluminação natural ao interior dos ambientes, quando usados integradamente com sistemas simples de iluminação, como janelas, gerando níveis mais altos de iluminação nas áreas mais distantes das janelas, onde a iluminação artificial seria requerida em horários diurnos (Li et al, 2010).

No cenário internacional, diferentes estudos tem desenvolvido dutos de luz solar e avaliado o desempenho lumínico dos mesmos, sob diferentes parâmetros geométricos e em condições ambientais diversas, avaliando também o cálculo de economia de energia e

payback dos sistemas (Li et al, 2010; Kim e Kim, 2010; Kocifaj, 2012; komar e Darula, 2012).

No âmbito brasileiro, apesar das condições climáticas favoráveis, existem poucas pesquisas sobre os dutos de luz solar e os diferentes benefícios obtidos a partir do uso destes sistemas (Toledo et al, 2012).

Destaca-se, dentre e estudos brasileiros, a pesquisa de Soto (2010), onde foi avaliada a capacidade de admissão e distribuição de luz natural mediante o uso de dutos de luz para melhorar o nível de iluminação em Habitações de Interesse Social, foi utilizado deste estudo a simulação computacional. Os resultados mostram um melhor desempenho lumínico do tubo em latitudes mais próximas ao Equador e em condições de céu coberto e parcialmente coberto.

Outro estudo conduzido no Brasil é o de Souza (2005). Nesta pesquisa desenvolveram-se diferentes maquetes com dutos de luz em escala 1:10 para avaliar o desempenho destes dutos de luz. Os dutos de luz contribuem com uma porcentagem de acréscimo de iluminâncias maior nos pontos mais afastados da janela, onde a iluminação natural é mais requerida. Verificou-se que o duto de luz pode possibilitar a redução da área da janela sem comprometer a iluminação nas áreas mais distantes da abertura (Souza, 2005).

Visando contribuir para a difusão do conhecimento sobre dutos de luz solar no Brasil, este artigo tem como objetivo analisar o desempenho de um protótipo de duto de luz solar, com diferentes dispositivos de controle de luz. Este dispositivo está instalado em uma casa de teste no Campus Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), localizada em Curitiba/PR.

Material e Métodos

A análise do desempenho do protótipo do duto de luz solar foi realizada em duas etapas: (1) comparação do desempenho dos sistemas de difusão de luz do duto de luz solar; e (2) análise do desempenho dos dispositivos de redirecionamento de luz. A análise foi realizada na cidade de Curitiba, com latitude de -25.51° e longitude de -49.27° . O azimute da casa é 21° .

Comparação do desempenho dos sistemas de difusão do duto de luz solar

Em esta pesquisa foi desenvolvido um tubo de luz solar, que foi posteriormente instalado numa casa de teste da Universidade Federal do Paraná. Este tubo de luz solar está

dividido em três partes principais: O coletor, o sistema de transporte de luz e o sistema de difusão de luz (Figura 1).

O limite superior do duto foi cortado em um ângulo 30° , como razão principal para orientar este corte ao norte, no local da instalação, otimizando a captação de luz. O coletor (Figura 1) é de policarbonato (PC) com proteção UV, com 89% de transmitância. O duto de alumínio está revestido internamente com uma lâmina Mylar®, com 98% de refletância. A relação diâmetro/comprimento é de 1:3, sendo o comprimento do tubo $C = 75$ cm e o diâmetro é de $\varnothing = 25$ cm (Figura 1).

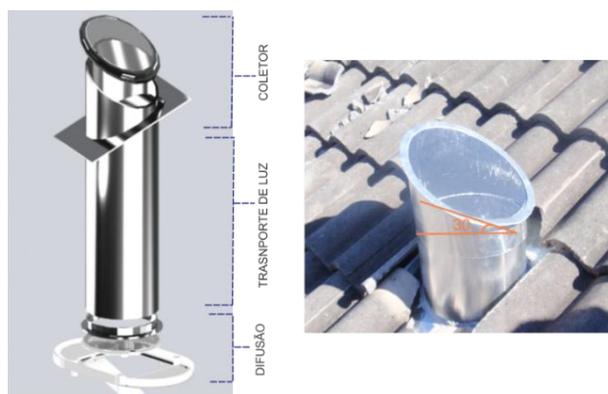


Figura 1. Componentes do tubo de luz solar desenvolvido e coletor instalado no telhado da casa de teste localizada no Campus Politécnico da Universidade Federal do Paraná

Para o sistema de difusão simples o material é um policarbonato com 89% de transmitância. Neste caso foi elaborado um sistema de controle da iluminação, este sistema permite a entrada total de luz (Figura 2a), com os dispositivos totalmente abertos, este caso serviria para os momentos onde a luz total transmitida seria necessária (Figura 2a). A segunda opção corresponde ao fechamento parcial através de duas peças em forma de semicírculo de acrílico semitransparente leitoso com 50 % de transmitância (Figura 2b), este dispositivo tem como finalidade ser usado nos períodos onde a luz total poderia causar algum tipo de desconforto e precisa-se da regularização no nível de luz natural. Considerou-se um sistema de fechamento da entrada da luz do difusor (Figura 2c), para assim comparar o nível de luz na sala sem o uso do duto solar, e considerando só a janela.



Figura 2. Sistema de controle de luz com difusor claro, semitransparente e difusor fechado

O ambiente onde foram realizadas as medições, tem como dimensões (3.82 x 2.40 x 2.60)m, e o percentual da janela na fachada (PJF) é de 30%. A refletância do piso é igual a 45 %, o teto possui refletância de 25 % e as paredes têm 70 % de refletância, a janela possui transmitância de 88 %. O eixo central do duto de luz está localizado a 2.82 m de distância da janela com relação ao eixo y e a 1.2 m com relação à janela no eixo x. Como pontos de análise estabeleceu-se 4 pontos, localizados à altura do plano de trabalho, a 75 cm de altura em relação ao nível do piso (Figura 3). Como equipamento para as medições foram utilizados quatro luxímetros LX1330B, posicionados nos pontos P1, P2, P3 e P4, demarcados na Figura 3.

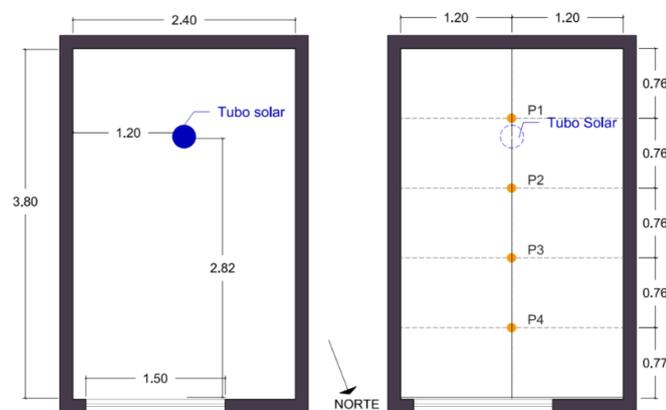


Figura 3 – Dimensões da sala e pontos de análise

As medições foram realizadas no período entre às 10h e 16h, entre junho e julho, considerando três variáveis de iluminação: o duto fechado, com o ambiente recebendo iluminação só da janela; o ambiente com o difusor semitransparente e o ambiente com a iluminação total do difusor. Para fazer a comparação entre estes sistemas foram organizados os resultados de acordo com 3 tipos de céu: céu claro, céu parcialmente coberto e céu coberto; e com as porcentagens de acréscimo com as duas alternativas de difusão.

Análise dos dispositivos de redirecionamento de luz solar

No protótipo foram instalados 2 dispositivos de redirecionamento, para avaliar a capacidade destes dispositivos para redirecionar a luz natural à outros planos de trabalho. Estas peças não estão fixadas no dispositivo de controle, é um elemento que pode ser colocado na peça de acrílico do sistema de controle de luz. O primeiro dispositivo é uma peça de 10 cm x 20 cm. Neste caso foi dado um ângulo de 30° com relação ao eixo y.

O segundo dispositivo tem maiores dimensões, abrangendo mais área da entrada de luz. Para esta peça foram dadas duas angulações: A primeira parte tem como dimensões: 25 x 25 cm, possui uma angulação de 30° com relação ao eixo y. A segunda parte está inclinado em mais um ângulo de 30° com relação ao eixo y, as dimensões são de 25 x 15 cm. Ambos dispositivos estão revestidas com uma lâmina adesiva com 95 % de refletância e podem ser instaladas em qualquer das duas aberturas ao lado difusor. A figura 4 mostra estes dois dispositivos:



Figura 4. Dispositivos de redirecionamento de luz.

Ao igual que na etapa anterior os resultados serão organizados de acordo aos 3 tipos de céu. Os registros das medições foram realizados em 3 pontos (P1, P2 e P3), à altura do plano de trabalho, a 75 cm de solo. O ponto 1 (P1) é o único que pertence ao ambiente de 2.4 m x 3.80 m onde foram feitas as análises anteriores (Figura 5). Este é o ponto mais próximo ao tubo de luz. O ponto 2 está localizado perto do eixo x do tubo de luz solar, está também localizado numa esquina, a 15 cm de distância entre ambas paredes. O ponto 3 é o mais afastado do tubo solar, e está a 15 cm de distância de uma das paredes da casa de teste (Figura 5).

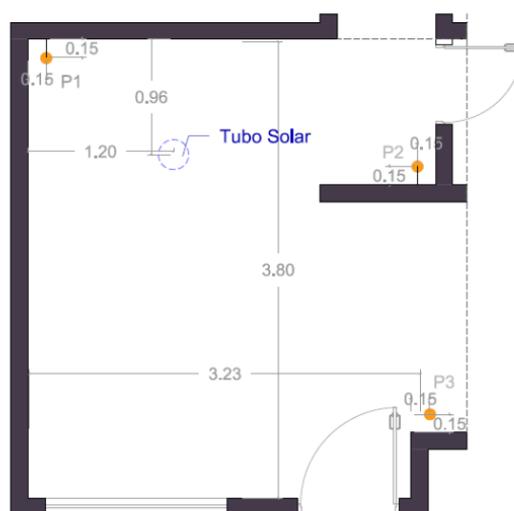


Figura 5. Ubiquação dos 3 pontos de medições para os dispositivos de redirecionamento de luz.

Resultados e Discussão

Comparação do desempenho dos sistemas de difusão do duto de luz solar

Para todos os tipos de céus e casos, as maiores porcentagens de incremento são observadas para o ponto 1, o ponto mais próximo ao duto de luz solar. Da mesma forma, este incremento diminui em direção ao ponto 4. De todos os dias analisados, para o tipo de céu claro o maior incremento atingido é de 80 % para o difusor com maior transmitância e de 47 % para o difusor semitransparente. Para o céu semicoberto o maior valor de acréscimo corresponde a 130 %, com o difusor claro, e para o difusor semitransparente o acréscimo mais elevado é de 46%. No casos do céu coberto o acréscimo mais elevado é de 150 % para o difusor claro e 56 % para o difusor semitransparente. Este valores anteriormente mencionados são para o ponto 1 e o acréscimo em ambos casos é a porcentagem em comparação com o difusor da entrada de luz fechado.

A Figura 6 apresenta a média da porcentagem de acréscimo para cada tipo de céu de todos os dias analisados. Como motivo de simplificação dos resultados foram eleitos três horários: as 12 horas, 13h30m e às 15h30m. Os pontos 1, 2, 3 e 4 nas Figuras correspondem as siglas p1, p2, p3 e p4 respectivamente.

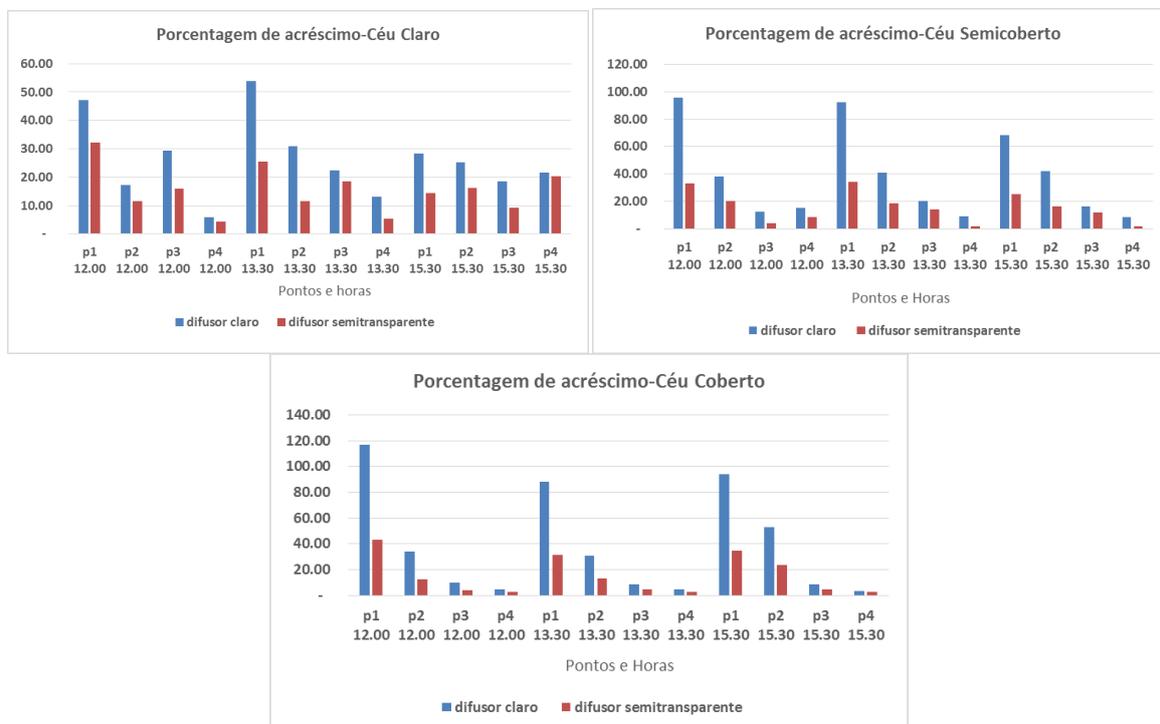


Figura 6. Média das porcentagens de acréscimo no ambiente, para os três tipos de céu.

Em função da porcentagem de incremento observa-se que os melhores acréscimos são para o tipo de céu coberto, seguido pelo tipo de céu semicoberto e o céu claro. Da mesma

forma os maiores acréscimos são para os pontos 1 e 2. Estes resultados são devido a presença da janela no ambiente, que contribui de forma significativa com a iluminação natural na sala. De não existir o tubo, a iluminação em estes pontos (afastados da janela) é muito baixa e requer da presença de outra fonte de luz, a diferença do dia de céu claro, onde esta iluminação nos pontos mencionados é mais elevada devido aos valores de iluminâncias maiores entregues pela janela, embora esta iluminação é ainda insuficiente, e desta forma o tubo solar contribui com melhorar o nível de iluminação, só que em menor porcentagem.

A seguir são apresentados os gráficos das iluminâncias para o ponto 1 analisado na sala de teste, como mencionado anteriormente, este ponto é o mais próximo ao tubo de luz. Como forma de simplificação dos resultados, tem sido eleitos só dois dias para cada tipo de céu. Em todas as figuras a serem mostradas a linha azul corresponde aos valores com o difusor fechado, a linha verde são aos valores com o difusor semitransparente e a linha vermelha são os valores com o sistema de controle de luz totalmente aberto e o difusor claro.

A figura 7 apresenta os níveis das iluminâncias no decurso do dia para o tipo de céu coberto; na parte direita das figuras apresentam-se os valores das iluminâncias externas em relação com as iluminâncias internas do ambiente, observa-se os maiores aumentos das iluminâncias para o difusor claro nos horários perto ao meio-dia. A pesar de ser este tipo de céu a condição ambiental menos favorável, nota-se para alguns horários, que ao usar o difusor claro de maior transmitância, pode-se melhorar consideravelmente o nível da iluminação.

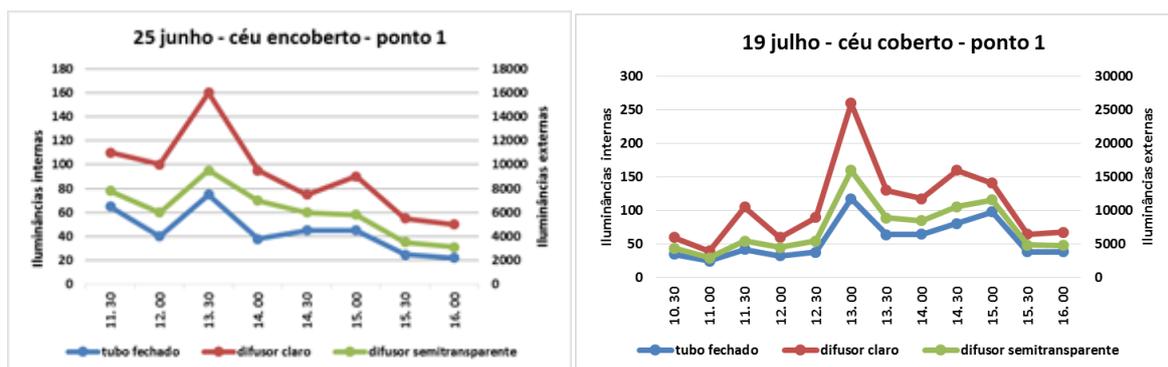


Figura 7. Iluminâncias para o ponto 1 no céu coberto.

Para o céu semicoberto (Figura 8), as iluminâncias interiores são mais elevadas em comparação ao caso anterior, na imagem mostra-se dois dias com iluminâncias externas diferentes, para alguns horários o aumento das iluminâncias é considerável com o uso do difusor claro. Como explicado anteriormente o acréscimo pode chegar até 130 %, chegando

este aumento a ajudar a atingir a iluminação requerida para tarefas mais específicas no plano de trabalho.

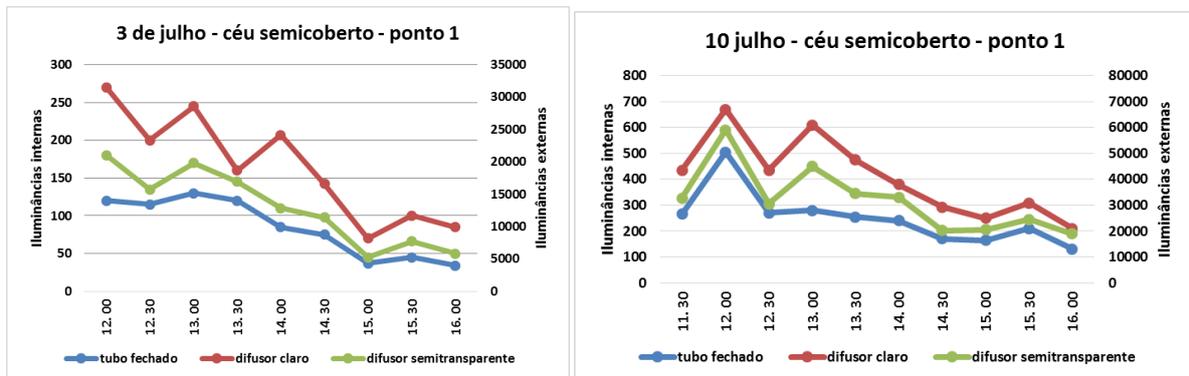


Figura 8. Iluminâncias para o ponto 1 no céu encoberto.

A figura 9 mostra as iluminâncias para o tipo de céu claro, neste caso as iluminâncias internas são as mais elevadas, em comparação com o caso anterior, devido às maiores iluminâncias externas. Como explicado, para alguns horários as porcentagens de incremento são as menores, isto devido à presença da janela no ambiente. Nos dias que foram tomadas as medições, com o difusor claro (linha vermelha) as iluminâncias chegam até 650 lux.

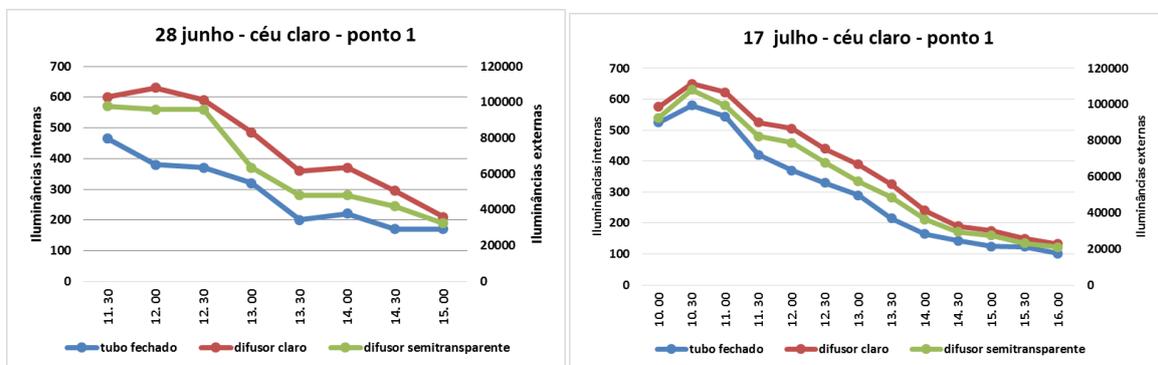


Figura 9. Iluminâncias para o ponto 1 no céu claro.

Análise do desempenho dos dispositivos de redirecionamento de luz solar

Nesta etapa os resultados tem sido organizados de acordo aos três tipos de céu: claro, semicoberto e coberto, foi calculada a média dos valores de todos os dias analisados, para determinados horários, são mostrados nos gráficos a seguir as iluminâncias nas três situações: Sem o uso de nenhum dispositivo, com o uso do dispositivo 1 e o dispositivo 2. Os resultados

são agrupados de acordo com os 3 pontos das medições, as barras verdes pertencem ao ponto 1, as barras laranjas ao ponto 2 e as barras azuis ao ponto 3.

Para o caso do céu coberto (Figura 10), os valores das iluminâncias internas são muito reduzidas e é onde os dispositivos tem o menor desempenho. O dispositivo 1 possui o desempenho mais baixo para aumentar as iluminâncias (lux) em todos os casos, e o aumento de iluminâncias através do dispositivo 2 é mais elevado, embora com resultados ainda baixos, para os três pontos analisados.

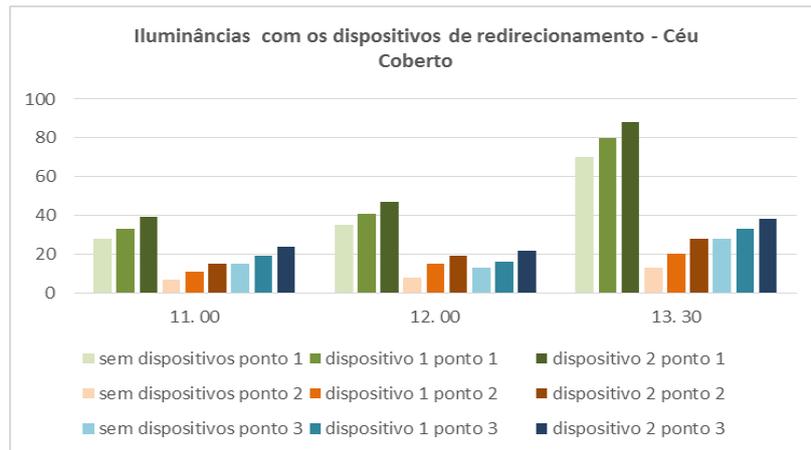


Figura 10. Iluminâncias com os dispositivos de redirecionamento de luz para o céu coberto

No céu semicoberto (Figura 11), o desempenho é melhor em comparação com o céu coberto, embora estes resultados diminuam consideravelmente ao final do horário diurno, ao igual que na etapa anterior o dispositivo 1 não aumenta de forma considerável a iluminação, isto é, devido ao fato que o dispositivo 1 não abrange toda a luz que sai da área do difusor, a diferença do dispositivo 2.

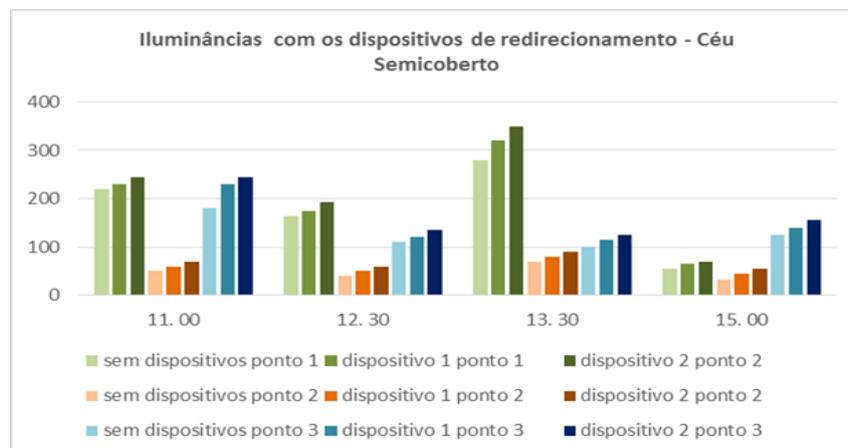


Figura 11. Iluminâncias com os dispositivos de redirecionamento de luz para o céu semicoberto

Para o caso do céu claro (Figura 12), os dispositivos de redirecionamento tem o melhor desempenho, chegando a aumentar até em 115 lux o valor das iluminâncias às 12 horas, para o dispositivo 2 e para o dispositivo 1, aumenta-se as iluminâncias até em 60 lux. Este desempenho ao igual que nos dois casos anteriores diminuem no decurso do dia.

Em todos os casos observam-se valores das iluminâncias mais elevados nos pontos 1, 3 e 2 respectivamente, independente do uso de qualquer dispositivo, devido à distância dos pontos do tubo de luz solar e a presença da janela. O melhor desempenho a partir do uso dos dispositivos é observado para o ponto 1 o desempenho mais baixo é para o ponto 3. A maior eficiência destes dispositivos nos momentos de luz solar direta e não difusa.

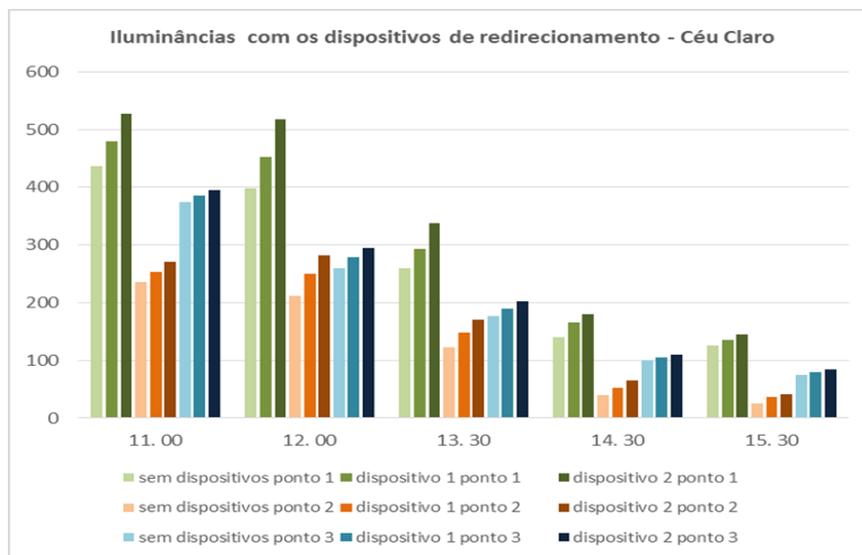


Figura 12. Iluminâncias com os dispositivos de redirecionamento de luz para o céu claro.

Conclusões

As análises conduzidas comprovam que houve um maior acréscimo das iluminâncias, principalmente nos pontos mais afastados da janela e mais próximos do duto de luz solar, para o céu encoberto e semicoberto. Para o caso do céu claro, este acréscimo não é tão elevado, porque a iluminação fornecida pela janela com este tipo de céu contribui com maiores valores de iluminâncias nos pontos afastados da janela. Em todas as situações analisadas, o emprego do difusor claro, mostrou-se como o mais eficiente, em comparação com o difusor semitransparente.

Dos dois dispositivos de redirecionamento de luz propostos, atinge-se maior eficiência com o dispositivo 2, de dimensões maiores, devido a que abrange mais área do

difusor de luz e por tanto tem mais capacidade de reflexão da luz natural. Assim mesmo, só obtém-se acréscimos consideráveis de luz no tipo de céu claro e semicoberto e nos pontos mais próximo ao duto de luz solar.

Apesar das condições climáticas não muito favoráveis, devido ao fato das medições terem sido realizadas durante o período de inverno, observa-se um bom desempenho do duto de luz solar. Outra limitação desta pesquisa foram os baixos valores das refletâncias do teto e das paredes, dentro do ambiente interno da casa de teste, onde o duto de luz solar foi instalado.

Referências

MME – Ministério de Minas e Energia (2013). **Balço Energético Nacional 2013**. Disponível em :< https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf >. Acesso em: 08/07/2013.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2012). **Projeção de Demanda de Energia Elétrica para os próximos 10 anos (2013 – 2022)**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20130117_1.pdf>. Acesso em: 07/01/2013.

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.

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.

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

SOTO S. F. J. **Avaliação do Desempenho Luminoso de Duto de Luz: Estudo da Implementação em Ambientes Padrões de Habitações Populares em Três Latitudes**. 142 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

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

LI, D. H. W.; TSANG, E. K. W; CHEUNG, K. L; TAM, C. O. An Analysis of Light-pipe System via Full-scale Measurements. **Applied Energy**, v. 87, n.1, p. 799–805, 2010.

KOCIFAJ, M.; KUNDRACIK, F.; DARULA, S; KITTLER, R. Availability of luminous flux below a bended light-pipe: Design modelling under optimal daylight conditions. **Solar Energy**, v.86, n.9, p. 2753–2761, 2012.

TOLEDO, G. E.; BUSCH, L. E.; PELEGRINI, A.V. Tecnologias e Benefícios dos dutos solares: Uma revisão estruturada da literatura visando identificar parâmetros de projeto e

contribuir para o design sustentável. In: IV SIMPÓSIO PARANAENSE DE DESIGN SUSTENTÁVEL, Curitiba, 2012, **Anais...**Curitiba, SPDS 2012.

SOUZA, D. A. **Avaliação Teórica e Experimental do Desempenho de Duto de Luz, na Cidade de São Carlos – SP.** 125 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

Recebido para publicação em: 07/10/2013

Aceito para publicação em: 27/02/2014