



O USO DE SENSORES FOTOSENSÍVEIS DE BAIXO CUSTO EM MODELOS REDUZIDOS PARA O ESTUDO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

**SCARAZZATO, Paulo Sergio (1); YAMANAKA, Marcos Hideki (2);
PEREIRA, Daniela Cardoso Laudares (3).**

(1) Arquiteto, Prof. Dr. do Departamento de Tecnologia da Arquitetura da FAU/USP e da FEC/UNICAMP, R: Dr. Antônio Lopes de Oliveira, 284 CEP: 13202-162, Jundiaí/SP, tel(11) 4607-2782,

e-mail:pasezato@usp.com.br

(2) Desenhista industrial, técnico em eletrônica, mestrando do Programa de Pós-Graduação na área de Tecnologia da Arquitetura da FAU/USP, R: Av. Lineu Prestes, 2242- Cidade Universitária CEP 045508-97, São Paulo/SP

e-mail:marcos@cnz.com.br

(3) Arquiteta e Urbanista, mestranda do Programa de Pós-Graduação na área de Tecnologia da Arquitetura da FAU/USP, Especialista em Conforto Ambiental e Conservação de Energia, tel: (11) 5042-3392, R: Coronel Conrado Siqueira Campos, 47 apto. 114ª- Jd. das Acácias, CEP 04704-140, São Paulo/SP

e-mail:danilaudares@uol.com.br

RESUMO

Este artigo descreve um projeto para montagem, calibração e utilização de foto-sensores de baixo custo, capaz de garantir boa margem de confiabilidade, compatível com as exigências de projeto e a sensibilidade humana. Testes realizados na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Brasil, com modelos reduzidos sob condições de céu real, mostraram que tais sensores têm um desempenho bastante satisfatório para estudos de iluminação natural ao longo de todo o ano, sob diferentes condições do clima luminoso local. O sistema desenvolvido acopla os foto-sensores a um datalogger também especialmente projetado e montado para a pesquisa referida e destina-se à verificação da iluminâncias em diferentes pontos do interior do ambiente considerado, como ocorre com os sistemas convencionais de fotocélulas disponíveis no mercado. O grande diferencial está no seu custo bastante reduzido, que possibilita a utilização de maior número de sensores, e a conseqüente montagem de uma malha de medições, permitindo assim maior detalhamento nas avaliações.

Palavras-chaves: foto-sensor, iluminação natural, datalogger, modelo físico reduzido, medição.

ABSTRACT

This article describes a project for assembly, calibration and use of low cost photosensitive sensors, capable to ensure good trustworthiness, compatible with both design requirements and human being sensitivity. Tests carried through in the Faculty of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, Brazil, with scale models under real sky conditions, had shown satisfactory performance for such photosensitive sensors for daylighting studies throughout the year, under different conditions of

the luminous climate. The developed system connects the photosensitive sensors to a datalogger also especially designed and mounted for the related research, focused on the measurement of the illuminance in different points of the interior of the considered environment, similar to what occurs with the conventional photocells systems available in the market. The differential is due to its reduced cost, making affordable the use of a larger number of sensors, and the consequent assembly of a mesh of measurements, thus allowing higher detailing in the evaluations.

Keywords: photo-sensitive sensors, daylighting, physical model, measurement

1. INTRODUÇÃO

A associação entre eficiência energética, sustentabilidade e conforto dos edifícios vem crescendo nos últimos anos. Em decorrência desta postura, tem crescido igualmente a busca por novos métodos de análise dos projetos e o aperfeiçoamento dos já consagrados. No caso da iluminação natural, a utilização de modelos reduzidos pode auxiliar sobremaneira o desenvolvimento do projeto, desde suas fases iniciais até os ajustes finos no projeto executivo, tanto na observação dos aspectos qualitativos, como na avaliação quantitativa, a qual requer, via de regra, alto investimento na aquisição de fotocélulas apropriadas para tal finalidade.

O presente trabalho tem o objetivo de apresentar o desenvolvimento de um equipamento para medições da iluminação natural em modelos reduzidos, incluindo os elementos foto-sensíveis para a captação da iluminância e um datalogger para a armazenagem dos dados coletados. Atualmente encontram-se no mercado excelentes equipamentos específicos para este tipo de medição, porém os mesmos não são economicamente acessíveis para o uso em larga escala. Assim, a pesquisa objetiva o desenvolvimento de um equipamento de medição que tenha como premissa básica um baixo custo comparado com aqueles encontrados no mercado.

O escopo desta pesquisa abrange dois tipos de sensores existentes no mercado: os chamados LDRs (Light Dependent Resistor) e os sensores de Fotodiodo. O critério para a escolha destes sensores além do baixo custo para a aquisição de ambos é a resposta espectral dos mesmos que apresentam suas curvas próximas à curva de sensibilidade do olho humano que possui a máxima sensibilidade numa faixa de 550nm entre o verde e o amarelo.

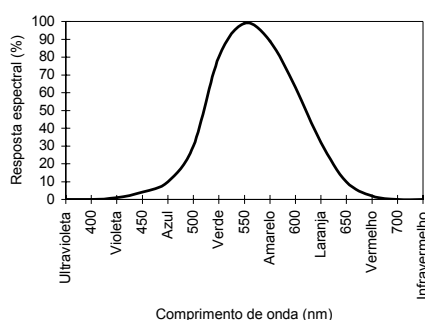


Figura 1: Curva óptica padrão da CIE
Fonte: CIE 18.2 (1983)

Segundo o projeto de norma da ABNT para a iluminação natural (parte 4) a qualidade dos instrumentos de medição é determinada através de cinco fatores:

- Resposta espectral que relaciona a curva de sensibilidade do sensor com a sensibilidade do olho humano,
- Sensibilidade à temperatura: as fotocélulas sofrem influência da variação de temperatura nas resistências dos circuitos associados às mesmas. Portanto existem alguns sensores mais sensíveis à temperatura do que outros com maior probabilidade de causar erros nas medidas. É

necessário corrigir as perturbações da variação da temperatura a fim de garantir leituras com resultados confiáveis.

- Resposta ao efeito cosseno: é a resposta do sensor para a luz incidente em diferentes ângulos. A iluminância E deve ser dada pela seguinte expressão:

$$E = E_n \cdot \cos\theta$$

Considerando esta premissa, outro fator a ser observado no desempenho do sensor é se o mesmo apresenta correção do efeito cosseno.

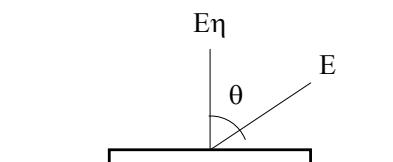


Figura 2: Efeito cosseno
Fonte: Projeto de norma ABNT

- Resposta à linearidade: quanto maior a resistência do circuito associado à fotocélula, maior será a não linearidade de resposta para iluminâncias elevadas. Isto acontece pela forma como é feita a leitura dos valores de tensão (diferença de potencial) que surge nos terminais dos sensores em função da corrente elétrica que circula nos sensores. Ao aumentar a impedância (resistência) de entrada dos sinais, diminui a corrente circulante no circuito, todavia, não de forma linear, sendo necessário corrigir estas distorções através de algoritmos matemáticos.
- Precisão: o erro total associado ao equipamento deve ser no máximo 10%.

Para que fossem testados os dois tipos de sensores propostos nesta pesquisa foi construído um modelo físico reduzido de um ambiente no tamanho de 6,4x 4,15 na escala de 1:12,5

2. MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS PARA O ESTUDO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Os modelos físicos em escala reduzida têm sido amplamente utilizados para o estudo da iluminação natural em análises quantitativas e qualitativas dos aspectos da luz devido à precisão obtida nestas simulações. A principal razão deste fato pode ser explicada pelas características físicas da luz, no espectro visível pelo olho humano, que possui comprimento de ondas extremamente reduzido (380-750nm) não distorcendo, desta forma, devido diferenças de escala.

Um modelo é uma representação de uma realidade, na qual a representação se faz através da expressão de certas características relevantes da realidade observada. (Echenique, 1975).

Portanto para que o estudo da iluminação em modelos reduzidos tenha um resultado muito próximo do que ocorre em um ambiente real, um dos pontos mais importantes a serem considerados é a correta reprodução da geometria do edifício assim como as propriedades de reflexão e transmissão dos materiais de construção deste e do seu entorno. A escolha das características que deverão ser reproduzidas da realidade deve ser feita depois de uma análise criteriosa do edifício e seu entorno para o entendimento dos aspectos que influenciam na iluminação natural. Por exemplo, os elementos no exterior o edifício deverão ser modelados caso estes sejam considerados aspectos críticos para a iluminação. No caso de uma iluminação lateral o piso próximo a esta janela terá uma influência de acordo com a refletância do mesmo, portanto deverá ser modelado. Para este mesmo edifício se a abertura for zenital, a modelagem do piso não terá nenhuma interferência na qualidade da luz. Neste caso a modelagem da cobertura será essencial para o estudo. Portanto todas as superfícies externas que refletem luz para o interior do edifício deverão ser modeladas.

Os modelos físicos para a análise da iluminação não necessitam de acabamento no seu exterior porque a aparência do edifício tem pouco ou nenhum impacto na qualidade da iluminação interna. A exceção deste caso é quando a superfície externa do edifício faz parte da estratégia de iluminação.

Um aspecto importante a ser observado nas medições dos modelos reduzidos é o tamanho dos sensores fotométricos em relação a escala do modelo. Estes devem possuir as menores dimensões possíveis para que sejam caracterizadas condições pontuais de iluminação. “Recomenda-se que não sejam utilizados sensores maiores que 0,03 m² na escala do modelo. Para sensores circulares, o seu diâmetro não deve ser superior a 20 cm na escala do modelo.” (Projeto de norma ABNT, 2003)



Fig. 03- Modelo Reduzido e medições com luxímetro, sensor LDR e fotodiodo

3. UTILIZAÇÃO DO SENSOR LDR



Figura 04: Sensor LDR
Fonte: Catálogo

O LDR (Light Dependent Resistor) também conhecido como célula foto-condutiva ou ainda de célula de foto-resistência é um componente passivo cuja resistência é função da intensidade luminosa que nele incide. Por esta característica ele é um resistor dependente da luz, isto é sua resistência muda de acordo com a intensidade luminosa podendo se transformar em um sensor de luz. Para obter as tensões resultantes da variação da intensidade luminosa o LDR deverá fazer parte de um circuito divisor de tensão, cuja finalidade será fornecer uma tensão de saída ($U_{saída}$).

Estes valores de tensão podem ser transformados em lux através de uma equação fornecida nos catálogos dos próprios sensores. No caso desta pesquisa o tratamento dos dados foi feito através de um software desenvolvido tanto para a conversão como para descarregar os dados registrados pelo datalogger.

Estes sensores, por serem passivos, ou seja, não geram corrente elétrica, exigem um circuito eletrônico para que possam ser lidos de forma correta, ficando a cargo do datalogger fazer com que circule uma corrente elétrica pelo LDR, tornando possível a leitura da tensão que posteriormente será convertida em lux.

O tamanho mais comum dos sensores LDR varia entre 1cm e 2,5cm de diâmetro. Quanto maior a superfície do sensor, maior a sua sensibilidade e capacidade de dissipar o calor.

Os materiais foto-condutivos mais frequentemente utilizados na sua construção dos LDRs são o sulfeto de cádmio (CdS) e o seleneto de cádmio (CdSe). Os sensores de sulfeto de cádmio são mais propícios para a utilização como sensores de iluminação pois possuem uma resposta espectral mais próxima à do olho humano.

4. UTILIZAÇÃO DE SENSOR FOTODIODO



Figura 05: Sensor de fotodiodo
Fonte: foto dos autores

Os fotodiodos, apesar de terem um custo mais alto que os sensores LDR, possuem uma resposta muito melhor para medições da luz natural em comparação ao LDR pois funcionam como geradores de corrente em função da intensidade de luz que incide sobre ele, sendo, portanto, um componente ativo. Outro aspecto importante é a baixa interferência da temperatura na precisão da leitura. Isto efetivamente torna o sensor mais confiável para medições em condições reais, uma vez que a insolação do modelo físico inevitavelmente o aquecerá.

A correção do ângulo de incidência dos raios luminosos (cosseno ϕ), dentro de determinados limites, é realizada através de um algoritmo que permite a integração da leitura

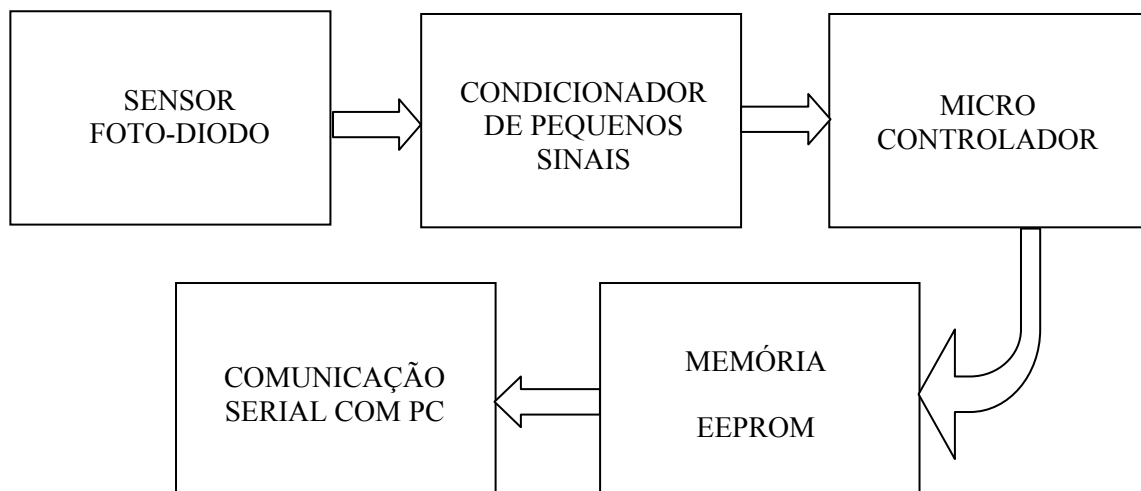
de iluminância em função do rendimento do sensor, já que esta curva de resposta é conhecida e disponibilizada pelo fabricante do sensor.

O limite máximo de intensidade de iluminância também é muito maior que a do LDR, permitindo chegar à dezenas de milhar de lux (klux). A diferença entre as curvas de sensibilidade espectral do sensor e a sensibilidade do olho humano é corrigida por um software de tratamento dos dados, através de algoritmos matemáticos.

5. DATALLOGGER

Algumas das dificuldades de medidas em iluminação natural ocorrem pela necessidade de leitura em diversos pontos do modelo físico ou mesmo do ambiente real, que em determinadas condições, por exemplo, modelos em escala muito reduzida ou construções muito grandes, tornam-se difíceis para se fazer medições pois é preciso modificar a posição dos sensores ou medidores de acordo com a malha de pontos a serem medidos. Isto pode levar um tempo considerável e as condições de céu podem modificar-se neste ínterim. Uma possibilidade mais precisa é medir todos os pontos ao mesmo tempo, ou com intervalos de tempo muito pequenos, da ordem de segundos entre os pontos. Para tanto, um equipamento de aquisição de dados (datalogger) é o mais indicado, pois permite a leitura de diversos sensores com intervalos de centésimos de segundos entre os pontos automaticamente, sem a necessidade de um operador. Estes dados ficam armazenados em um banco de memória interna do equipamento, podendo ser descarregada em um momento apropriado.

O diagrama de blocos abaixo representa resumidamente o funcionamento do datalogger:



Como os sinais gerados pelos sensores foto-diodos são muito pequenos, da ordem de nA ($10^{-9}A$), o datalogger precisa fazer o condicionamento dos sinais, isto é feito com o uso de um amplificador operacional, que permite a multiplicação da leitura por centenas de vezes, além de converter a leitura de corrente (Ampère) para tensão (Volt). De posse deste dado, é necessário transformá-lo em informações digitais para que possa ser transmitida com maior facilidade para um software, para tanto foi utilizado um conversor AD (analógico/digital) de 10 bits. Este conversor traduz a leitura analógica, que varia de 0 a 5 Volts, em dados digitais, com resolução de 1024 pontos, ou seja, na escala até 5klux cada incremento de ponto representa 4,88 lux, por exemplo uma leitura de 1350 lux corresponde a 277 pontos. Isto permite que a informação seja armazenada em uma memória não volátil EEPROM (*electrically erasable programmable read only memory*), evitando a perda dos dados mesmo sem alimentação de energia elétrica. Com os dados acessíveis na memória, é possível transmiti-los a qualquer momento a um microcomputador. Porém isto depende de um protocolo de comunicação, que é um conjunto de informações que trafegam entre os equipamentos para que os dados sejam colocados em uma seqüência desejada e não se percam durante a sua transmissão.

A utilização de um microcontrolador facilita todas as funções exigidas por um datalogger, uma vez que possui internamente um processador de dados que executa funções matemáticas, conversores analógicos / digitais com capacidade de leituras em milionésimos de segundo, memórias volátil e não volátil. Para aumentar a quantidade de dados armazenados, é necessário usar uma memória externa (eeprom), que amplia de centenas de dados para milhares de dados registrados.

Para a referida pesquisa foi desenvolvido um datalogger que pode ser programável segundo o critério desejado: leituras instantâneas ou a média entre 60 valores obtidos a cada minuto, sendo que o intervalo de aquisição de dados é de 1 segundo, o que reduz as oscilações espúrias de ruídos elétricos.

6. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Para a comunicação do datalogger com o PC (Personal Computer) é necessário um software que reconheça o protocolo de comunicação do primeiro, além de transformar os dados em um resultado inteligível, de forma padronizada, através de tabelas e/ou gráficos.

O protocolo desenvolvido foi extremamente simplificado para acelerar os testes, sendo que, através de comandos no software do PC, é possível solicitar que o datalogger envie todos os dados armazenados em sua memória. Assim que este reconhecer a solicitação, reenvia um dado de início de transmissão, na seqüência todos os dados armazenados, e finalmente um dado de final de transmissão.

O software do PC em questão foi desenvolvido utilizando a plataforma do Visual Basic 6.0, e comunica-se com o datalogger com um baud rate (taxa de comunicação) de 9600 bps (bits por segundo), decodificando pacotes de 8 leituras (bytes) em seqüência, correspondentes às medidas dos 8 sensores.

No caso da leitura dos sensores LDR os dados de tensão medidos foram convertidos para lux através da equação:

$$\text{Iluminância} = ([\text{dado}] * 0.0196) ^ {(-1,849078 * e(6,443809 - (0,04716 * ([\text{dado}] * 0.0196)))} (\text{lux}) \quad [\text{Eq. 01}]$$

Esta equação descreve matematicamente a linearização do comportamento elétrico do LDR. Ao multiplicar a informação do [dado] pelo fator 0.0196 o programa efetua a reconversão do dado digital em um valor de tensão (V), permitindo então que seja utilizado para se encontrar o valor em Lux.

Para os sensores de fotodiodo os dados de tensão medidos foram convertidos para lux através da equação:

$$\text{Iluminância} = [([\text{dado}] * 0.0196 / 100000) / 0.000000009] (\text{lux}) \quad [\text{Eq. 02}]$$

Assim como para o LDR, a multiplicação pelo fator 0.0196 é a reconversão do dado digital em um valor de tensão, porém, como o fotodiodo é um gerador com um comportamento linear, é necessário apenas multiplicar o ganho do condicionador de sinal (100000) e converter o dado em Lux.

Estes pacotes podem ser gravados ao encerrar as aquisições, e os dados são tabulados separados por sensores, em um arquivo com extensão .m, que podem ser tratado com o software Matlab 5.0, a fim de gerar os gráficos, que facilita a interpretação dos resultados.

7. METODOLOGIA EMPREGADA E RESULTADOS OBTIDOS

Como metodologia para a aferição das medições captadas nos sensores foram feitas medidas simultâneas da iluminação natural, utilizando um luxímetro comercial da marca Homis e os sensores LDR e de fotodiodo sob condições de iluminâncias variadas, com o objetivo de comparar os valores obtidos. O datalogger foi programado para fazer aquisições instantâneas para a aquisição de dados dos sensores LDR e de fotodiodo e os dados do luxímetro foram registrados manualmente.



Figura 06: Foto dos equipamentos utilizados para as medições
Fonte: foto dos autores

7.1 Medição utilizando os sensores LDR e Foto-diodo comparados ao luxímetro

Para obter dados confiáveis do luxímetro comercial é importante aguardar alguns segundos antes de registrar o valor lido pelo instrumento, para que o sensor acomode-se à incidência de iluminância. No caso deste experimento, foi registrada primeira leitura após 60 segundos do posicionamento do sensor, ligação e ajustes de escala do luxímetro. Os intervalos entre as medidas foram feitos em função dos intervalos de aquisição de dados do datalogger, para evitar discrepâncias entre medidas com condições de céu diferentes.

Os sensores LDR e de fotodiodo foram posicionados no plano horizontal, sem incidência direta de raios solares, com a mínima distância entre eles e próximo ao luxímetro, observando que a altura do topo dos mesmos ficasse alinhada entre eles e os sensores do luxímetro comercial.

Os registros dos dados foram feitos de forma automática, através do datalogger, que posteriormente foram descarregados no PC (personal computer) para que fossem convertidos em lux, tabulados, comparados com os dados do luxímetro e finalmente analisados.



Figura 06: Foto dos sensores
Fonte: foto dos autores

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das medições constatou-se que os sensores LDR variaram em média 20,5% em relação às medidas realizadas com o luxímetro ao passo que os sensores de fotodiodo variaram em média 22,5%. Apesar destes valores estarem acima da margem de erro de 10% apontado como aceitáveis pela norma de iluminação natural, consideramos os resultados animadores. As futuras etapas desta pesquisa tem por objetivo reduzir a margem de erro apresentada. Alguns recursos começam a ser testado mas ainda não se dispõe de dados suficientes para incluí-los neste artigo.

Verificou-se que os sensores de foto-diodo são mais adequados para para as medições da iluminação natural em modelos. Isto deve-se ao fato destes sensores serem dotados de um dispositivo de correção cosseno o que aumenta a confiabilidade do equipamento.

A possibilidade da realização de medições com o equipamento proposto é um valioso recurso, pois permite testar as condições da iluminação natural a um baixo custo através do modelo reduzido que já é uma ferramenta bastante difundida no meio dos arquitetos.

O preço final do conjunto do equipamento com 8 sensores de LDR ou fotodiodo, datalogger e do software é de aproximadamente US\$700,00 o que corresponde a 12% do valor de equipamentos semelhantes existentes no mercado, tornando desta forma mais acessível à todos os interessados pelo assunto.

9. ANEXOS

Tabela 01- Resultados obtidos através da comparação do luxímetro com os sensores de fotodiodo

Luxímetro	fotodiodo1	% diferença	fotodiodo2	% diferença	fotodiodo3 (lx)	%diferença
250	218	12,8	196	21,6	218	12,8
364	327	10,16	283	22,25	305	16,20
374	283	24,33	305	18,44	————	————
380	302	20,52	282	25,78	261	31,31
390	305	21,79	327	16,15	305	21,79
420	327	22,14	327	22,142	327	22,14
490	392	20	414	15,51	327	33,26
602	501	16,7	501	16,77	501	16,77
1056	850	19,50	850	19,50	697	33,99
1134	872	23,10	893	21,25	763	32,71
1240	893	27,98	937	24,43	850	31,45
1400	1068	23,71	1177	15,92	893	36,21
1700	1373	19,23	1503	11,58	1177	30,76
2200	1787	18,77	1830	16,81	1438	34,63
2500	2005	19,8	2048	18,08	1547	38,12
2600	2114	18,69	2157	17,03	1678	35,46
2700	2092	22,51	2331	13,66	1721	36,25
2800	2157	22,96	2222	20,64	1678	40,07
2900	2397	17,34	2767	4,58	1983	31,62

Tabela 02-Resultados obtidos através da comparação do luxímetro com os sensores de LDR

luxímetro	lux LDR 1	lux LDR 2	lux LDR 3	lux LDR 4	%dif LDR1	%dif LDR 2	%dif LDR 3	%dif LDR 5
250	194	221	177	261	22,4	11,6	28,5	20,7
364	287	328	254	357	21,0	9,8	30,2	26,7
374	280	328	248	357	25,0	12,2	33,7	26,9
380	295	337	260	347	22,3	11,2	31,5	24,3
390	303	357	267	367	22,3	8,5	31,6	24,3
420	328	378	295	367	21,8	10	29,77	21,8
490	378	440	337	401	22,8	10	31,17	22,8
602	440	502	427	538	26,8	16,6	29,12	26,8
1056	828	996	729	828	21,5	5,7	30,9	24,9
1134	906	1100	729	906	20,0	3,0	35,7	30,0
1240	996	1221	793	1046	19,7	1,5	36,0	33,2
1400	1100	1445	906	1100	21,4	3,2	35,2	28,8
1700	1364	1856	1158	1364	19,8	9,2	31,8	24,1
2200	1738	2133	1631	1738	21	3,0	25,8	21
2500	2133	3181	1857	2133	14,7	27,2	25,7	20,5
2600	2133	2916	1987	2133	17,9	12,1	23,5	17,9
2700	2133	2916	1987	2133	21,00	8,0	26,3	21,00
2800	2296	3181	1987	2296	18,0	13,6	29,0	23,8
2900	2296	2916	2296	2296	20,8	0,5	20,8	20,8

10. REFERÊNCIAS

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto 02:135.02-004 ago./2003.** Iluminação Natural - Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações. Rio de Janeiro, 2003.

ECHENIQUE, Marcial. Modelos: uma discusión. In “La estructura del espacio urbano” Gili, Barcelona, 1975.

KUINCHTNER, Cassiano; DIFANTE, Eduardo; DAZA Erik; NOGUEIRA Vinicius. Protótipo de um luxímetro utilizando foto-diodo. Universidade Federal de Santa Maria/RS.