

Sistema de iluminação integrada em edificação lat 15 sul e potencial de uso de geração fotovoltaica.

Integrated lighting systems in building at 15° S latitude: Use of photovoltaic generation as a complement.

LUCIANE CLEONICE DURANTE. UFMT - Universidade Federal de Mato Grosso - Cuiabá, Brasil / lucianedurante@hotmail.com

IVAN JULIO APOLÔNIO CALLEJAS. UFMT - Universidade Federal de Mato Grosso - Cuiabá - Brasil / ivancallejas@ig.com.br

CARLOS BEUTER. UFMT - Universidade Federal de Mato Grosso - Cuiabá, Brasil / cbeuter@ufmt.br

DANILO FERREIRA DE SOUZA - Universidade federal de mato grosso - Cuiabá, Brasil / danilo@ufmt.br

KARYNA DE ANDRADE CARVALHO ROSSETI. UFMT - Universidade Federal de Mato Grosso - Cuiabá, Brasil / karyna.rosseti@gmail.com

Palavras-chave:
emissões de CO₂,
eficiência energética,
iluminação natural.

RESUMO

Este artigo teve por objetivo geral avaliar o desempenho energético e luminoso de uma edificação considerando situações de proteção e exposição solar totais de suas aberturas. Especificamente, os objetivos foram: estimar curvas de isoiluminâncias a partir de medições e simulações; estimar a economia energética proporcionada por sistema de iluminação complementar controlado pelo usuário (Cenário 1- real) e por sistema que desconsidera a contribuição da iluminação natural (Cenário 2- simulado); dimensionar áreas de painéis fotovoltaicos para atender a iluminação artificial desses Cenários e estimar as emissões evitadas pelo aproveitamento da luz natural. Os resultados demonstraram que o Cenário 1 apresentou valores médios de Contribuição de Iluminação Natural (CIN) de 2% e economia de 10,5% do total de energia anual se comparado ao Cenário 2, que por sua vez proporcionou CIN até 17 vezes maior, caracterizando iluminação excessiva. Seriam necessários o cobrimento de 3% e 37% do telhado com painéis fotovoltaicos para suprimento da energia dos Cenários 1 e 2, respectivamente. A implantação do sistema fotovoltaico mostrou-se economicamente inviável, com tempo de retorno do investimento de 60 anos, superior à sua vida útil. Porém, ambientalmente, evidenciaram-se os benefícios, evitando-se a emissão de 689kgCO₂/ano, equivalentes à neutralização processada por 4 unidades arbóreas no mesmo período.

ABSTRACT

The objective of this article is to evaluate building energy and illumination performance considering situations of total sun protection and exposure of building openings. The specific objectives were: to estimate equal illuminance curves with measurements and computer simulations; to estimate the energy savings provided by a supplementary lighting system controlled by the user (Scenario 1 - real) and another system that ignores the contribution of natural lighting (Scenario 2 - simulated); to quantify photovoltaic panel areas to meet these artificial lighting scenarios (1 and 2) and to estimate the CO₂ emissions avoided by the use of natural light. It was demonstrated that Scenario 1 presented average Contribution of Natural Lighting (CIN) values of 2% and saved 10.5% of total annual energy when compared to Scenario 2. The last CIN presented was up to 17 times higher than Scenario 1, which provided excessive illumination in the room studied. It would be necessary to cover 3% and 37% of the roof with photovoltaic panels to supply energy for Scenarios 1 and 2, respectively. The installation of a photovoltaic panel system would be economically unviable, with a payback period of 60 years, longer than its lifetime. However, it was possible to demonstrate its environmental benefits, the elimination of 689kg of CO₂ emissions/year, which is equivalent to the neutralization provided by four arboreal units in the same period.

Keywords:
CO₂ emission, energy
efficiency, natural
lighting.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a temática da eficiência energética nas edificações está incorporada na agenda dos governos na forma de políticas de racionalização do consumo de energia e bens renováveis. considerando que investimentos na eficiência energética de edificações além de oferecer benefícios financeiros também proporcionam benefícios ambientais, muitos países vêm percebendo a importância de edificar de forma sustentável, estabelecendo políticas públicas que visam o aumento da eficiência das suas edificações.

Nesse sentido, existem hoje, na maioria dos países, instrumentos que qualificam o desempenho das edificações quanto ao seu consumo de energia, promovendo a diminuição do desperdício, o aumento da eficiência dos equipamentos e maior adequação das edificações ao clima dos locais em que se inserem. Além disso, esses programas promovem a geração de energias limpas, redutoras das emissões de poluentes no ambiente, tais como a fotovoltaica.

A União Europeia, em 2002, definiu uma política de uso eficiente de energia por meio de um conjunto de medidas de redução do consumo e diversos países implantaram sistemas de certificação que informam aos cidadãos a qualidade termoenergética dos edifícios. Nos EUA, as normas de eficiência são usadas há cerca de 30 anos. Na Holanda e Portugal, a certificação é obrigatória desde 1995 e 2010, respectivamente (MELO et al., 2011).

No Brasil, com a crise do setor elétrico em 2001 e após um período de racionamento de energia, o governo começou a estabelecer ações para estimular o uso eficiente da energia elétrica nos edifícios. Neste contexto, tem-se a elaboração da Lei 10.295, que estabelece mecanismos de eficiência energética em edificações (BRASIL, 2001). Uma das consequências desta normatização foi o fortalecimento do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), que lançou, no ano de 2003, o PROCEL-Edifica: Plano de Ação para Eficiência Energética em Edificações. Com isso, em janeiro de 2012, o Brasil estabeleceu o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), o PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem), bem como seu desdobramento ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia). Assim, o processo de qualificação do quão eficiente é uma determinada edificação tornou-se desta forma sistematizado e quando se comparam edificações que apresentam condições ambientais similares, é mais eficiente aquela que despense menor consumo energético para manutenção dessas condições.

Um dos requisitos do processo de qualificação da eficiência de um edifício é o sistema de iluminação. Entende-se por um sistema de iluminação eficiente aquele que apresenta menor potência instalada e, conseqüentemente, menor consumo de energia, garantidas as condições adequadas de iluminação (BRASIL, 2010). Neste sentido, o aproveitamento da luz natural, além de garantir os níveis mais adequados para as atividades humanas, reduz a necessidade da

luz artificial, resultando em menor consumo de energia (FONSECA, DIDONÉ e PEREIRA, 2012). Albuquerque e Amorim (2012) afirmam que o uso da iluminação natural, além de ser importante recurso para promover qualidade no ambiente e bem-estar, tem impacto significativo na redução do uso de energia.

Os sistemas de iluminação são responsáveis por aproximadamente 24% do consumo de energia em edificações comerciais no Brasil, segundo Lamberts et al. (1997). Tendo em vista a grande disponibilidade de luz dos céus brasileiros, muita economia poderia ser feita através da utilização mais intensiva do recurso natural. Um bom projeto de iluminação natural pode fornecer a iluminação necessária durante 80% a 90% das horas de luz diária, permitindo significativa economia de energia para fins de iluminação artificial (VIEIRA, 2011).

Souza (2003) propôs uma metodologia para estimar a potencialidade de aproveitamento da luz natural utilizando sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica gasta em iluminação artificial e verificou que as estratégias de controle automático podem reduzir o consumo, chegando a atingir um potencial de aproveitamento da luz natural de 87%.

O potencial de economia advindo do uso da iluminação natural é diretamente determinado pelos fatores de localização geográfica, clima, entorno, uso e características físicas da edificação. Quanto menor a latitude, maior a quantidade de luz disponível na abóbada, muito embora se aumente a necessidade de condicionamento térmico para fins de resfriamento (VIANNA E GONÇALVES, 2007).

A Diretriz 91 da Comunidade Europeia relativa ao desempenho energético dos edifícios recomenda que na avaliação da quantidade de energia consumida nestes, deve-se levar em conta a influência positiva do aproveitamento de iluminação natural (COMUNIDADE EUROPÉIA, 2001).

A excelente qualidade da luz natural justifica a necessidade de priorização de seu uso, visto que é a única fonte de luz que responde de forma completa às exigências do sistema visual humano. Vários estudos já foram desenvolvidos e demonstram que conscientes ou não, a maioria das pessoas, preferem a luz natural à artificial.

Considerando a variabilidade da disponibilidade da luz natural ao longo do dia, é seguro afirmar que, na maioria das vezes, haverá necessidade de um sistema de iluminação artificial complementar de forma a garantir os níveis de iluminação adequados no ambiente (VIANNA e GONÇALVES, 2007; DIDONÉ e PEREIRA, 2010; GHISI, TINKER e IBRAHIM, 2005).

Ho, Chiang, Chou, Chang e Lee (2008) investigaram o desempenho de tipologias de janelas em salas de aula com iluminação unilateral, em região subtropical. A tipologia com bandeja de luz dupla resultou em economia de 70% de energia elétrica e proporcionou maior uniformidade ao longo da largura, exigindo luz

artificial complementar apenas na área mais afastada da janela.

Uma alternativa sustentável para o sistema artificial complementar é a geração a partir de células fotovoltaicas. Este tema vem sendo estudado, muito embora seja incipiente a legislação que especifique o aproveitamento da luz natural com o uso do potencial energético solar, Almeida e Gomes Martins (2009) afirmam que painéis fotovoltaicos utilizados em sistemas de iluminação proporcionam economia energética.

A geração de energia fotovoltaica se baseia na intensidade de luz incidente sobre os painéis, sendo necessária exposição direta à luz do sol na maior parte do dia (FARRET, 2010). Desta forma, paredes e telhados fotovoltaicos devem ser projetados para que sua orientação e dimensionamento atendam à capacidade de carga demandada (BROWN e DEKAY, 2002).

Este artigo tem por objetivo geral investigar o desempenho energético e luminoso em edificação na latitude 15,5° Sul com as quatro fachadas envidraçadas, considerando dois modelos das aberturas da edificação: com proteção solar total e com exposição solar total. Os objetivos específicos são: (a) estimar as curvas de isoiluminâncias a partir de medições e simulações; (b) estimar a redução do consumo de energia proporcionada por dois sistemas de iluminação: sistema complementar controlado individualmente pelo usuário (Cenário 1) e sistema que desconsidera a contribuição da iluminação natural (Cenário 2); (c) dimensionar as áreas necessárias de painéis fotovoltaicos para fins de iluminação artificial para atender aos Cenários 1 e 2 e (d) estimar as emissões de CO₂ que seriam evitadas pela economia advinda do aproveitamento da luz natural.

2. MATERIAIS E METODO

O método experimental considerou a medição da iluminância no edifício do Centro SEBRAE de Sustentabilidade (Serviço de Apoio a Pequenas e Médias Empresas), em Cuiabá/MT, cuja fachada principal foi implantada com azimute de 297°, constituído de Pavimento Térreo que abriga um Salão Principal e de Pilotis contendo Área Externa, Auditório e Sala Técnica (Figura 1). O layout de planta aberta dispõe de três áreas de ocupação permanente: uma área de reuniões à direita (fachada nordeste), postos de trabalho na parte central e uma biblioteca à esquerda (fachada sudeste).

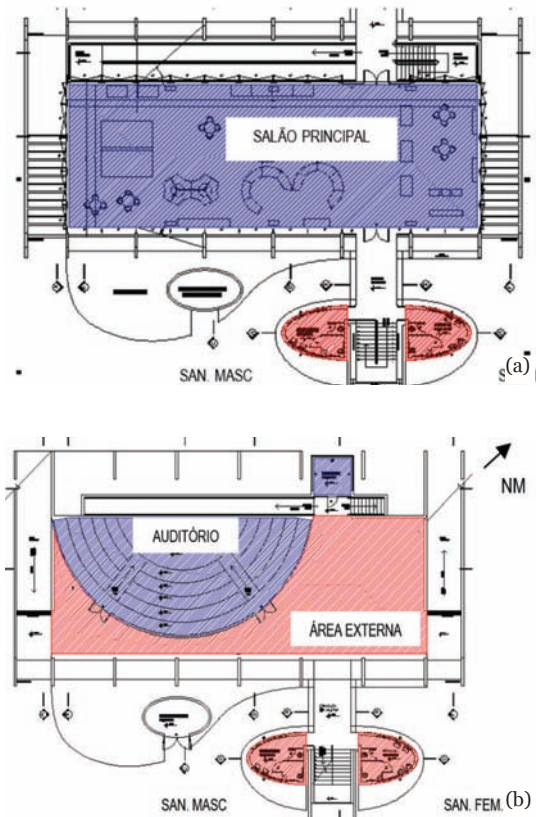


Fig.1 (a) Planta baixa do Pavimento Térreo e (b) Pilotis do CSS.

O ambiente objeto de estudo é o Salão Principal do Pavimento Térreo, com dimensões de 10,55m de largura e 29,70m de comprimento, onde laboram até 14 colaboradores por 8 horas diárias. A cobertura foi edificada em casca dupla de concreto (Figura 2a). A escolha deste ambiente se justifica pelo fato de que em sua concepção foi priorizado o uso da luz natural e por não possuir sistema de iluminação artificial geral. Outra característica é a iluminação zenital composta por seis luminárias de acrílico leitoso com 50cm de diâmetro dispostas na cumeeira da casca de cobertura (Figura 2b). O pé direito é variável, com altura das janelas da fachada noroeste e sudeste de 5,72 e 2,91m, respectivamente (Figura 2c).



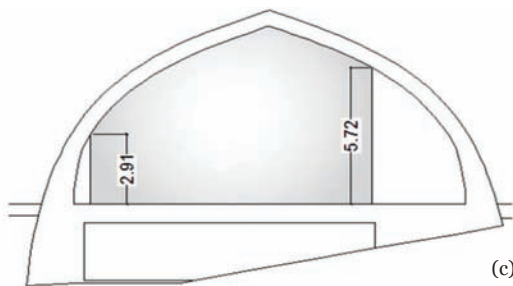


Fig.2 (a) Cobertura em casca, (b) iluminação zenital do Salão Principal e (c) seção transversal esquemática com as alturas dos vidros nas fachadas principal e secundária (cotas em m).

Fig.3 (a) Luminárias pedestais nos postos de trabalho, (b) fechamento em vidro da fachada noroeste, beiral e parte interna dos brises e (c) e vista externa dos brises móveis de chapa perfurada.

Utiliza-se apenas iluminação de tarefa em algumas horas do dia, constituída por luminárias pedestais móveis posicionadas nos postos de trabalho ou mesas de reuniões, conforme a necessidade (Figura 3a). Os fechamentos verticais são em sua totalidade de vidro temperado 10mm, totalmente protegidos por beirais e brises móveis em chapa metálica perfurada. A vegetação do entorno também proporciona sombreamento na edificação (Figuras 3b e 3c).

Conforme NBR 15215-4 (ABNT, 2005), calculou-se o número de pontos de medição de iluminância pela Equação 1, onde C e L são largura e comprimento do ambiente (m), respectivamente e H_m é a distância vertical (m), entre o plano de trabalho e o topo da janela.

$$K = \frac{(C + L)}{H_m(C \cdot L)}$$

Equação 1

Por ser de permanência transitória, desconsiderou-se a parte do Salão Principal que abriga a biblioteca, tomando-se como comprimento 23,50m, obtendo-se K=1,91 e 16 pontos de medição, conforme NBR 15215-4 (ABNT, 2005). Por questões de adequação ao layout, a malha foi traçada com 5 fileiras de 3 pontos de medição, totalizando 15 pontos.

No centro dos retângulos que compõem a malha de

medição, em altura de 80cm, a iluminância foi medida por meio de 15 registradores automáticos marca HOBO U12-012 (Figura 4b), devidamente calibrados entre si antes da medição, que registram a faixa de 10 a 32280 lux, programados para efetuar registros em intervalos de 15 minutos. O período de realização das medições foi de 14 a 18/11/2013 e as condições de nebulosidade eram de céu parcialmente nublado nos três primeiros dias e nublado nos dois últimos. Os resultados da iluminância (em lux) foram tabulados para o período diurno (das 6 às 18h) em termos de médias horárias dos 5 dias de medição. Curvas de isoiluminância para o horário das 12h foram elaboradas, em termos de Contribuição de Iluminação Natural (CIN), definida pela NBR 15215 (ABNT, 2005). A CIN representa a razão entre a iluminação natural em um determinado ponto do plano horizontal interno, devido à luz recebida direta ou indiretamente da abóbada celeste com uma distribuição de iluminâncias conhecida (EP), e a iluminação em um plano horizontal externo produzida pela abóbada celeste, com distribuição de luminâncias conhecidas (EH_{ext}), expressa em porcentagem (Equação 2). Considerou-se a variação de 1% entre as curvas e os valores intermediários foram aproximados para números inteiros.

$$CIN = \frac{E_p}{E_{Hext}} \cdot 100 (\%)$$

Equação 2

2.1. Método de simulação

O método de simulação computacional foi utilizado para elaboração das curvas de isoiluminâncias, considerando o modelo atual da edificação na qual foram realizadas as medições, o que permitiu a calibração do modelo. Para tanto, utilizou-se o software ReluxPro - Light Simulaton Tool, da Autodesk, de livre acesso.

A etapa de simulação de edifícios, segundo Oliveira (2010), deve ser trabalhada primeiramente para fins de calibração do aplicativo computacional, por meio da qual é assegurado que as predições do modelo matemático e do objeto estudado estão em consonância. Na sequência, o aplicativo deve ser validado, verificando-se a fidedignidade entre resultados da simulação e as condições reais de funcionamento. Desta forma, foi construído o modelo com as quatro fachadas dispendo de proteções solares, com o qual foi realizada a calibração entre os dados medidos e simulados, considerando as curvas de isoiluminância média do período de medição, às 12h.

Após calibração do modelo, as proteções solares das fachadas foram retiradas, para a simulação e elaboração das curvas de isoiluminâncias com as quatro fachadas expostas.

Para o cálculo das áreas de painéis fotovoltaicos foram estabelecidos dois cenários de demanda de energia. O primeiro cenário exprime a forma como a edificação foi concebida e é usada atualmente, na qual não existe iluminação artificial geral, apenas a iluminação de destaque e os usuários fazem uso de iluminação complementar em pedestal, disposto em cada posto de trabalho. O segundo cenário consiste de um sistema que desconsidera a contribuição da iluminação natural e que atribui toda a iluminação necessária de 500lux nos postos de trabalho à iluminação artificial, valor este recomendado para a atividade de escritórios, segundo a ISO NBR 8995 (2013). Os resultados foram expressos em termos de demanda de energia para suprir a iluminação complementar durante o período em que a mesma é necessária (no Cenário 1) ou a iluminação total (no Cenário 2).

O sistema complementar do Cenário 1 consiste de luminárias do tipo pedestal com 2 lâmpadas T5 de 14W e 2 reatores de 2W, de controle individual dos usuários, disponibilizados em cada posto de trabalho. A energia demandada deve suprir a iluminação de 500lux nos postos de trabalho e 300 lux nas circulações. No sistema do Cenário 2, que desconsidera a contribuição da iluminação natural, foi considerada uma densidade de iluminância de 10,5W/m², com vistas a atender aos requisitos do nível de eficiência A, do regulamento brasileiro de eficiência energética de edificações (PROCEL, 2006).

2.2. Economia de energia do Cenário 1 em relação ao Cenário 2.

A economia de energia (ec) entre os cenários 1 e 2 foi calculada conforme a equação 3, onde ei é a energia gasta no cenário 2, no período de um mês (kwh); ep é a energia gasta no cenário 1 no período de um mês (kwh); et é a média de consumo energético mensal total da edificação (kwh) e ec%, o percentual de economia.

$$Ec\% = \frac{Ei - Ep}{Et + (Ei - Ep)} * 100$$

Equação 3

O consumo médio mensal obtido através do histórico de faturas de energia elétrica dos períodos de janeiro de 2012 a julho de 2013 da edificação é de 4.246,7kWh/mês (Tabela 1).

Mês/Ano	Consumo (kWh)	
	2012	2013
jan	3.444	2.706
fev	4.428	3.690
mar	4.510	5.904
abr	4.756	3.854
mai	4.674	4.182
jun	2.952	3.772
jul	2.952	3.936
ago	3.526	
set	4.592	
out	5.904	
nov	5.986	
dez	4.920	
Consumo Médio (kWh)	4.246,7	

Tabela 1 Histórico de consumo de energia elétrica no período de 01/2012 a 07/2013.

2.3. Dimensionamento da área necessária para painéis fotovoltaicos.

O potencial de geração fotovoltaica foi estimado com base nos valores de radiação solar disponíveis no arquivo climático do local de estudo (15,5°S; 56,5°O), utilizado em simulações termoenergéticas no software Energy Plus (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2013). Os valores fornecidos por este arquivo climático são apresentados a cada 15min para todos os dias de um ano, de modo que foram considerados todos os valores que se encontram dentro do intervalo das 06h00min às 18h00min, sendo que os mesmos foram somados para obter a radiação fornecida a cada hora do dia. Posteriormente, calculou-se o valor médio mensal para cada intervalo de hora de um mesmo mês, com o intuito de estimar o valor médio horário de radiação solar e o potencial de geração fotovoltaica.

Os meses com maiores valores médios de radiação são Agosto e Dezembro, com aproximadamente 805W/m², enquanto Janeiro tem o menor valor médio de 529W/

m². O valor médio anual de radiação é aproximadamente 690W/m².

Com base no valor médio anual de radiação solar (DOE, 2013), calculou-se a área mínima de painéis fotovoltaicos para suprir a demanda de energia elétrica necessária para complementar à iluminação natural nos dois cenários propostos. Para tanto, foi necessário levar em consideração que os painéis fotovoltaicos um potencial de conversão de energia solar para energia elétrica de 103W/m² (BARBOSA, 2010).

2.4. Avaliação da viabilidade econômica e ambiental.

Avaliou-se a viabilidade financeira da proposta de implantação das placas fotovoltaicas para suprir a iluminação artificial necessária para complementar a iluminação natural. Uma proposta só pode ser considerada viável se os benefícios por ela alcançados são maiores que os custos de sua implantação. Para tanto, utilizou-se de uma ferramenta de análise econômica que “trata da relação entre valores monetários e o tempo”, conforme IBAM/Eletróbrás (2004). Essa avaliação foi feita por meio do índice de custo de energia conservada (CEC), que verifica se determinada solução traz vantagens ao empreendimento, pois considera a instalação e a economia gerada no consumo de energia pelo uso de novos equipamentos. A avaliação é feita em reais por quilowatt hora (R\$/kWh) e pode ser calculada a partir da Equação 4, conforme Carlo (2008), onde CEC é o custo de energia conservada, em R\$/kWh; TCC é o custo das medidas de conservação de energia (MCE), em R\$; ΔE é a energia economizada pela implementação da MCE em relação a um caso base, em kWh/ano; n é a vida útil da MCE, em anos e d é a taxa de desconto em base anual, aqui equiparada ao Índice Nacional de Custos ao Consumidor (INCC), usualmente aplicado no setor da indústria da construção civil no Brasil, no valor de 7,89%.

Equação 4

$$CEC = \left(\frac{TCC}{\Delta E} \right) \cdot \left(\frac{d}{[1 - (1 + d)^{-n}]} \right)$$

Para verificar a viabilidade econômica da solução, o valor do custo de energia conservada é dividido pelo valor da energia elétrica fornecida pela concessionária para a edificação, no valor de R\$0,38/kWh (U\$0,15/kWh), segundo CEMAT (2014) e só será considerada vantajosa economicamente se esse resultado for inferior a 1 (Equação 5).

Equação 5

$$\left(\frac{CEC}{Custo kWh} \right) < 1$$

Tradicionalmente, o CEC é avaliado em conjunto com a economia de energia que ele proporciona. O seu conceito está relacionado a uma comparação com a tarifa de energia: caso o CEC seja menor que o custo de 1 kWh (tarifa de energia), o investimento é considerado vantajoso.

Para avaliação da quantidade de emissões de CO₂ evitadas pela adoção da MCE considerou-se a relação de 0,115kgCO₂/kWh, proposta por BEN (2014).

3. RESULTADOS

3.1. CURVAS DE ISOLUMINÂNCIAS

A Figura 4 apresenta as curvas de isoiluminância traçadas a partir da iluminância média do período de medição nos pontos de 1 a 15, às 12h. Os valores médios da Contribuição da Iluminação Natural (CIN) variaram de 6 a 1%. A iluminação natural é mais abundante na fachada 63° (pontos 1, 6 e 11) e no ponto 2, com 1326 lux ou CIN=6%. Nos pontos 5 e 14, obtiveram-se os valores de CIN=2% e valores de iluminância de 263 e 409lux, respectivamente. Nos demais pontos obteve-se CIN=1%, com iluminação natural uniforme.

Destaca-se que as condições de nebulosidade eram de céu parcialmente nublado nos três primeiros dias e nublado nos dois últimos, sendo os resultados obtidos representativos desta condição de céu.

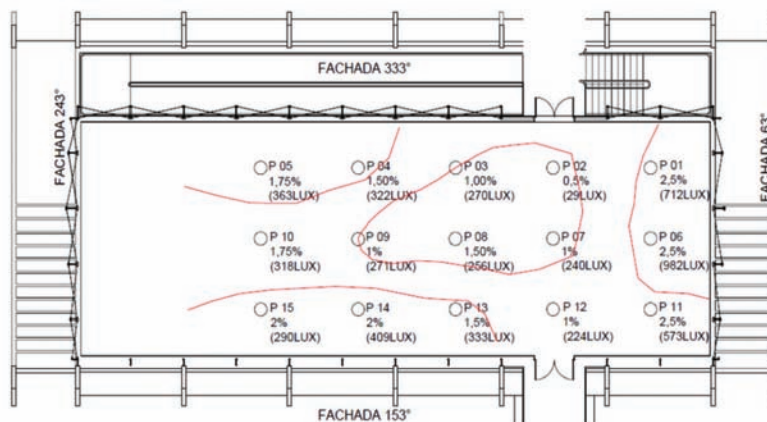


Fig. 4 Curvas médias de isoiluminância dos pontos 1 a 15, a partir de dados medidos no período de 14 a 18/11/2013.

A Figura 5 apresenta as curvas de isoiluminância geradas pela simulação da do dia 14/11, às 12h. Com exceção dos pontos 2 e 15, observa-se similaridade no comportamento das curvas, em que a iluminação natural decresce da fachada 63° para o interior do edifício, com variação dos valores de 1000 a 200lux.

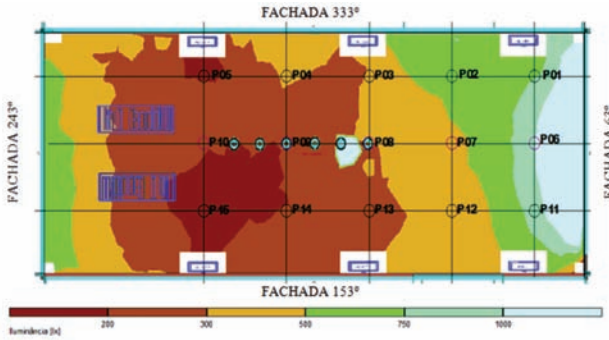


Fig. 5 Curvas de isoiluminância a partir de dados simuladas do dia 14/11/2013, às 12h, modelo do edifício com proteção solar total.

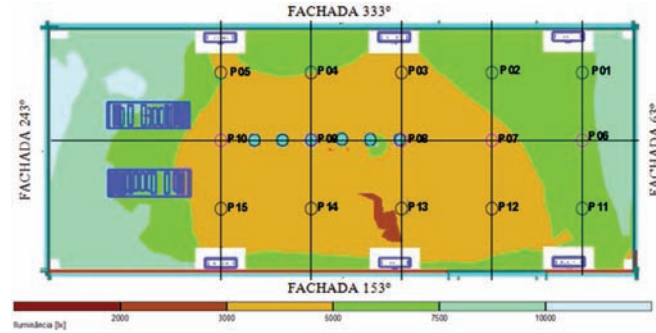


Fig. 8 Curvas de isoiluminância simuladas para o modelo do edifício sem as proteções solares, para o dia 14/11, às 12h.

Para fins de calibração dos dados medidos foram comparados com os valores simulados (Figura 6), obtendo correlação linear positiva com R2 de 0,7303 (Figura 7), após exclusão do ponto 2, justificado pelo comportamento de outlier.

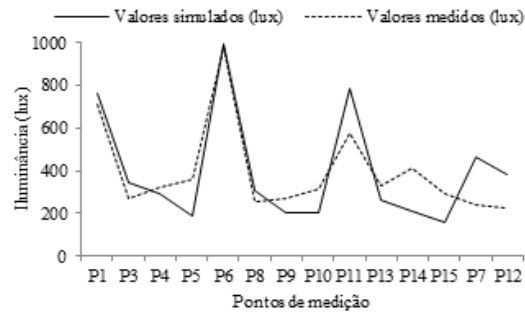


Fig. 6 Iluminância simulada no modelo com proteção solar total às 12h do dia 14/11 e iluminância medida no período de 14 a 18/11/2013, às 12h.

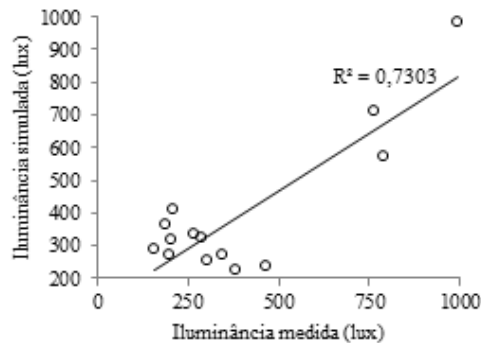


Fig. 7 Correlação entre a iluminância simulada no modelo do edifício com proteção solar total e iluminância medida.

Admite-se, portanto, que o modelo da simulação pode ser utilizado para representar o comportamento da edificação em outras situações que não as medidas, permitindo o estabelecimento do cenário no qual foram retiradas as proteções solares (Figura 8).

Observa-se que a retirada dos brises resultou em iluminação natural excessiva no interior do edifício, uma vez que seus fechamentos verticais são totalmente em vidros. Os valores de CIN passam a 32, 31 e 26% nos pontos 1, 6 e 11 da fachada 63°, respectivamente. Os demais pontos obtiveram acréscimos de 6 a 17 vezes (Tabela 2, Figura 9).

Viana e Gonçalves (2007) recomendam para o Brasil valores máximos de 2,5% e a situação das aberturas sem proteção solar representaria ofuscamento e inadequação do ambiente para as atividades de escritório que nele se desenvolvem, além de ganhos térmicos excessivos. Ressalta-se que não é raro encontrar a tipologia de edifícios com as fachadas em vidro e sem proteção total, mesmo em clima tropical, como o da cidade em que este estudo se desenvolveu. Os resultados evidenciam a importância dos elementos de proteção solar das fachadas e o controle permitido por um bom projeto arquitetônico.

Pontos de medição	Contribuição de Iluminação Natural (CIN) [%]		
	Modelo com proteção solar total		Modelo sem proteção solar
	Medido	Simulado	Simulado
P1	3%	3%	32%
P3	1%	2%	17%
P4	1%	1%	22%
P5	2%	1%	22%
P6	4%	2%	31%
P7	1%	1%	21%
P8	1%	1%	15%
P9	1%	1%	14%
P10	1%	3%	16%
P11	2%	3%	26%
P12	1%	2%	18%
P13	1%	1%	13%
P14	2%	1%	13%
P15	1%	1%	16%

Tabela 2 Contribuição da Iluminação Natural (CIN) no modelo do edifício com proteção solar total medido, simulado e modelo do edifício sem proteção solar, no dia 14/11 às 12h.

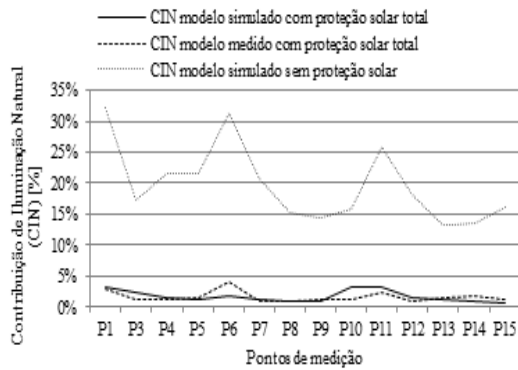


Fig. 9 Contribuição da Iluminação Natural no modelo do edifício com proteção solar total (simulado), real e modelo do edifício sem proteção solar, no dia 14/11 às 12h.

3.2. DEMANDA ENERGÉTICA

3.2.1. Cenário 1: sistema complementar controlado pelo usuário

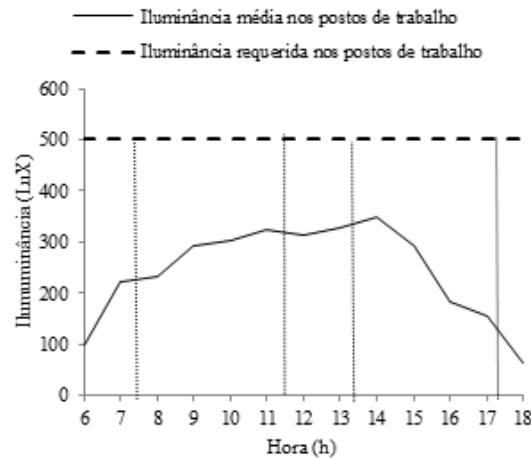
O funcionamento se dá em horário comercial das 7h30min às 11h30min e das 13h30min às 17h30min, de segunda à sexta.

Os resultados obtidos das medições evidenciaram que a iluminação natural não consegue suprir a iluminância média descrita pela norma durante as 8 horas do dia em que os postos de trabalho são ocupados (Figura 10-a), devendo nesses casos serem acionados os pedestais. Já nas circulações, os níveis requeridos não são atingidos apenas no final do dia, mas sempre superiores a 100lux, de forma que a necessidade de complementação da iluminação natural foi desprezada (Figura 10-b).

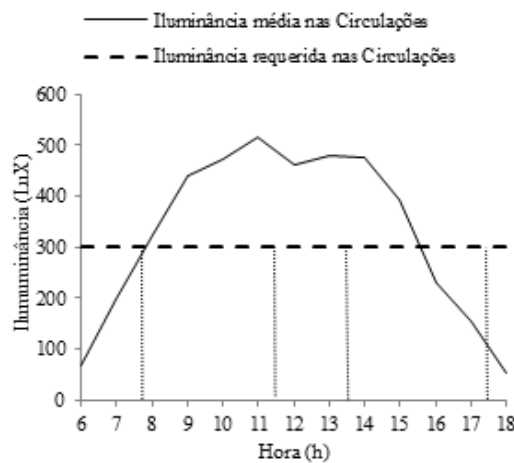
Considerou-se que os pedestais utilizam luminárias com 2 lâmpadas T5 de 14 W e 2 reatores de 2W, como iluminação complementar em todos os postos de trabalho, admitindo-se que neles a iluminação natural não é satisfatória e que o sistema pode ser controlado pelo usuário.

A potência de iluminação de cada pedestal é dada pela somatória das potências das lâmpadas e reatores (2 lâmpadas de 14W+2 reatores de 2W=32W) e a potência do sistema de iluminação (P_i , em W) é calculada pelo produto do número de pedestais (14 unidades) pela potência de iluminação de cada um deles (32W). A energia elétrica mensal consumida é calculada como o produto da potência do sistema de iluminação pelo tempo de funcionamento (8 horas diárias em 22 dias de trabalho).

Os valores obtidos para a potencia do sistema de iluminação e da energia mensal consumida foram de 448W e 78,85kWh, respectivamente.



(a)



(b)

Fig. 10 (a) Iluminância média medida e requerida nos postos de trabalho e (b) nas circulações.

3.2.2. Cenário 2: sistema que desconsidera a iluminação natural

Ao se classificar o ambiente como Escritório – Planta livre e tomando-se como referência o RTQ-C (PROCEL, 2006) é requerida densidade de potência de iluminação (DPI) do ambiente para obtenção do nível A de eficiência energética de 10,5W/m² e o ambiente possui área de 312,92m².

Considerando-se que os níveis de iluminamento serão supridos em totalidade por iluminação artificial e desprezando as contribuições de iluminação natural existente, a potência do sistema de iluminação (P_i , em W) é o produto da DPI requerida (10W/m²) pela área do ambiente (312,92m²) e a energia mensal consumida (E_i , em kWh) o produto da potência do sistema de iluminação pelas horas mensais de funcionamento (8h por dia, 22 dias por mês, totalizando 176 horas). Os valores obtidos para a potência do sistema de iluminação e da energia mensal consumida foram de 3.285,66W e 578,27kWh, respectivamente.

3.3. Economia de energia do Cenário 1 em relação ao Cenário 2

A economia de energia entre os Cenários 1 e 2 foi calculado conforme a Equação 3. Dado que não foi projetada iluminação geral no salão principal da edificação, apenas iluminação de destaque com lâmpadas LED e iluminação específica com luminárias pedestais, tem-se uma redução de consumo referente a não utilização de iluminação diária para o ambiente. A consideração da contribuição da iluminação natural e do sistema complementar controlado pelo usuário estima uma economia mensal de 10,5% do consumo total de energia elétrica.

3.4. Dimensionamento das áreas de painel fotovoltaico para fins de iluminação artificial

Considerando o valor médio de geração fotovoltaico de aproximadamente 103,5W/m², para atender a demanda de 3.285,66W, no caso de toda iluminação ser suprida artificialmente (Cenário 2), são necessários 31,74m² de painéis fotovoltaicos. Finalmente, considerando as condições de uso atuais, onde o usuário tem o controle sobre o acionamento da iluminação dos pedestais (Cenário 1), a demanda é de 448W, sendo necessários 4,32m² de área de painéis (Tabela 3).

3.5. Avaliação econômica e ambiental.

A partir de um pré-dimensionamento do sistema fotovoltaico composto por placas, controlador de carga solar, inversores, baterias, sistema de fixação e mão de obra para instalação, estimou-se um custo de aproximadamente R\$30.000,00 (U\$12.104).

O consumo de energia referente aos Cenários 1 e 2 é de 578,78 e 78,85kWh/mês, respectivamente. A energia economizada é de 499,43kWh/mês e 5993,14kWh/ano. Avaliando-se o custo de energia conservada (CEC), conforme Equação 3, tem-se CEC= 0,46 R\$/kWh (0,19U\$/kWh). Então, para análise da eficiência, o CEC é dividido pelo valor do kWh, resultando em 1,21, provando o que não há benefício financeiro da proposta, quando se analisam apenas questões econômicas, pois o tempo de retorno do investimento é de 60 anos, superior a 25 anos, que é o tempo de vida útil previsto para as placas.

Considerando que na geração de energia no Brasil, a relação de emissão de CO₂ é de 0,115kgCO₂/kWh (BEN, 2013), com a economia de 5993,14kWh/ano, são evitadas a emissão de 689kg de CO₂ na atmosfera, o que equivale à neutralização processada por cerca de 4 unidades arbóreas no mesmo período, conforme Maxiambiental (2014).

Esse resultado refere-se apenas à contribuição de uma edificação e destaca-se que, se a prática de aproveitamento eficiente da luz natural fosse estendida aos demais edifícios comerciais, os quais segundo Lamberts et al. (1997) consomem 24% da energia total em iluminação, verificar-se-ia amplitude de benefícios ambientais mais relevantes.

CONCLUSÃO

	Cenário 1	Cenário 2
Descrição	Iluminação complementar sob o controle do usuário	Toda iluminação suprida artificialmente por iluminação geral
Abrangência	Posto de Trabalho (500 lux) + Entorno (300 lux)	Posto de Trabalho e Entorno com 500 lux
\bar{E}_m (lux)	274±139	500 lux
Demanda (W)	448,00	3.285,66
Área de Painel Fotovoltaico (m²)	4,32	31,74

Tabela 3 Cenários dos sistemas de iluminação e área necessária de painéis fotovoltaicos.

Foi investigado o desempenho energético e luminoso de uma edificação na latitude 15,5° Sul e 56,5° de longitude Oeste, de planta retangular, com as quatro fachadas envidraçadas que dispõem de elementos de proteção solar total. Essa edificação foi escolhida como objeto de estudo por ter obtido classificação nível A de eficiência energética, segundo o regulamento brasileiro de eficiência energética e por não dispor de iluminação geral, sendo sua premissa de projeto, o aproveitamento máximo da luz natural.

Por meio de medições, obtiveram-se níveis de iluminâncias entre 500 e 1000 lux próximo à fachada orientada a 63° e valores inferiores a 400 lux nos demais pontos, evidenciando uma iluminação natural uniforme na área de trabalho. Os maiores valores da Contribuição de Iluminação Natural (CIN) foram de 6 e 4%, em apenas dois pontos de medição, sendo que nos demais 13 pontos, os valores foram entre 1 e 2%.

Após calibração satisfatória do modelo do edifício, utilizando-se de simulação computacional, investigou-se o impacto da retirada dos elementos de proteção solar das fachadas. Os valores da CIN passaram de 2% para 20%, muito acima do valor máximo recomendado de 2,5%, para que os ganhos térmicos e o consumo de energia para resfriamento não sejam excessivos. Nessa situação de exposição, caracterizou-se iluminação excessiva e reiterou-se a necessidade de uso de proteções solares, sendo esses resultados passíveis de serem extrapolados para outras edificações.

Uma vez que a radiação luminosa média disponível externamente foi da ordem de 22.000lux, conclui-se que os elementos de proteção solar são eficientes quanto ao controle da iluminação que exercem. Desta forma, verificou-se que a edificação atende aos valores de CIN recomendados, com iluminação uniforme e ausência de radiação solar direta, com excelente qualidade para a realização das atividades de escritório.

Ao compararem-se os níveis de iluminância com os requisitos normativos de 500 lux nos postos de trabalho e de 300 lux nas áreas de circulação, observa-se que há necessidade de iluminação complementar apenas nos postos de trabalho, durante 8 horas diárias.

A edificação dispõe de um sistema complementar, composto por iluminação do tipo pedestal disponibilizado em cada posto de trabalho, sob controle individualizado dos usuários (Cenário 1). Esse sistema permite uma economia de 10,5% do consumo anual de energia elétrica, se comparado a um sistema que tivesse o suprimento de 500lux em todo o ambiente e desconsiderasse a iluminação natural (Cenário 2).

Concluiu-se, também, que a energia solar pode tornar a edificação autossuficiente em relação ao consumo de energia elétrica para fins de iluminação artificial. No caso em questão, a adoção de 4,32 m² de painéis fotovoltaicos seriam capazes de alimentar a iluminação artificial necessária para complementar a iluminação natural. Com relação ao potencial de geração fotovoltaica, verificou-se que cobertura da edificação tem uma área de cerca de 150 m² orientada a 333°, ou seja, os painéis fotovoltaicos ocupariam menos de 3% da área de cobertura com

orientação favorável à instalação de placas. Para suprir a demanda total de energia elétrica do Cenário 2, a área de placas necessárias se elevaria para 31,74m².

Em locais de baixa latitude, como a região onde se desenvolveu esse estudo, onde a disponibilidade de luz natural é abundante, destaca-se a contribuição desta pesquisa, na qual os resultados evidenciam que o aproveitamento da iluminação natural associado à presença de elementos de proteção pode contribuir positivamente na redução do consumo de energia da edificação.

Observou-se, neste projeto eficiente, que diante da abundância de iluminação natural local, é necessário utilizar os elementos de proteção solar para controlar a radiação direta e desse controle surge a necessidade de complementação da iluminação com sistema artificial. Concluiu-se, desta forma, que os sistemas integrados compõem solução viável e econômica, uma vez que a economia média gerada foi de 10,5% ao ano.

A implementação do sistema passivo de geração fotovoltaica para fins de suprimento da iluminação mostrou que o custo da energia economizada (CEC) é maior que o custo de 1 kWh (tarifa de energia) e o investimento foi considerado não vantajoso, sob ponto de vista econômico. No entanto, a análise ambiental evidenciou que com a economia de 5993,14kWh/ano resultante do sistema integrado, são evitadas a emissão de 689kgCO₂/ano na atmosfera, o que equivale à neutralização processada por cerca de 4 unidades arbóreas no mesmo período.

AGRADECIMENTOS.

Agradecemos ao Serviço de Apoio às Pequenas e Médias Empresas (SEBRAE) pela disponibilização do espaço do Centro SEBRAE de Sustentabilidade para a realização desta pesquisa. O CCS é a unidade de referência nacional do Sistema SEBRAE no tema da sustentabilidade.

BIBLIOGRAFIA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 15215: Iluminação natural. Rio de Janeiro. 2005.
ALMEIDA, A.; Gomes Martins, A. Iluminação eficiente em edifícios: a grande lacuna regulatória. Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra, Coimbra, n. 16, 2009.

BARBOSA, L. A. M. Estudo de Eficiência de Sistemas Fotovoltaicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Porto: [s.n.], 2010.

BEN. Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese. Ano base 2013. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 30 Set. 2014.

BRASIL. Lei 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 18 out. 2001. Disponível em: <http://www4.planalto.gov.br>. Acesso em: junho de 2012.

Brasil. Manual para Aplicação dos Regulamentos: RTQ-C e RAC-C. Rio de Janeiro: INMETRO, 2010.

Brown, G. Z.; Dekay, M. Sol, Vento e Luz: Estratégias para o Projeto de Arquitetura. 2ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

Carlo, J. C. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-Residenciais. Florianópolis, 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

CEMAT. Centrais Elétricas Mato-grossense. Tarifas. Disponível em: < <http://www.cemat.com.br/files/2014/07/Valores-de-Tarifas-2014.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2014.

Didoné, E. L.; Pereira, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 139-154, Out/Dez 2010.

DOE. EnergyPlus Energy Simulation Software. United States Department of Energy, 2013. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

Comunidade Europeia. Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, Bruxelas, Dez. 2002.

Farret, F. A. Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica. 2ª. ed. Santa Maria: UFSM, 2010.

Fonseca, W. D.; Didoné, E. L.; Pereira, F. O. R. Modelos de predição da redução do consumo energético em edifícios que utilizam a iluminação natural através de

regressão linear multivariada e redes neurais artificiais.

Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p.163-175, Jan/Mar 2012.

Ghisi, E.; Tinker, J. A.; Ibrahim, S. H. Área de janela e dimensões de ambientes para iluminação natural e eficiência energética: literatura versus simulação computacional. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 81-93, Out/Dez 2005.

IBAM/Eletróbrás. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. Manual de Prédios Eficientes em Energia Elétrica. 2004. Rio de Janeiro.

Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. São Paulo: PW Editores, 1997. Maxiambiental. Carbono Neutro. Disponível em: <<http://www.maxambiental.com.br/>>. Acesso em: 30 Set 2014.

Melo, A. P., Costola, D., Lamberts, R., Hensen, J. Determinação do nível de eficiência da envoltória de edificações comerciais de acordo com o RTQ-C. In: XI ENCAC e VII ELACAC. Anais do XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Búzios, Rio de Janeiro, 2011.

Ho, M., Chiang, C., Chou, P., Chang, K., Lee, C. Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classrooms. Energy and Building. v. 40, p. 1844-1855. 2008

Oliveira, R. P. Utilização de um aplicativo de simulação computacional na avaliação de desempenho térmico de protótipo de Habitação de Interesse Social. 124f.

Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2010.

Procel. Procel Edifica - Eficiência Energética nas Edificações. Procel Info - Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética, 2006. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acesso em: 15 Abril 2013.

Souza, M. B. Potencialidade de aproveitamento da luz natural através da utilização de sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica. Florianópolis, 2003. 208p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina.

U.S. Department of Energy. EnergyPlus Utilities. U.S. DoE, 2013. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_utilities.cfm>. Acesso em: 15 Abril 2013.

Vianna, N. S.; Gonçalves, J. C. S. Iluminação e arquitetura. São Paulo: Geros, 2007.

Vieira, F. M. Iluminação Natural. Pontifícia Universidade

Católica de Goiás, 2011. Disponível em: <<http://professor.ucg.br/SiteDocente/>>. Acesso em: 18 fev. 2014.