



COMPARAÇÃO DE ILUMINÂNCIAS INTERNAS E EXTERNAS OBTIDAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Greici Ramos (1); Enedir Ghisi (2)

(1) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, greici@labeee.ufsc.br

(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, enedir@labeee.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Caixa Postal 476, Florianópolis - SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-5184

RESUMO

Para uma boa avaliação do desempenho termo-energético da edificação é necessário analisar também o uso da iluminação natural, uma vez que o uso desta influencia na carga térmica da edificação. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar as diferentes iluminâncias internas calculadas por quatro programas de simulação: Energyplus, Daysim/Radiance, Troplux e Radiance. A análise foi realizada através da comparação dos valores da iluminância interna, gerada através de simulações realizadas para salas com três geometrias diferentes (quadrada, retangular rasa e retangular profunda) e para cinco cidades: Belém, Brasília, Florianópolis, Genebra e Oslo; de latitudes diferentes, entre 27°S e 59°N. A partir da comparação dos resultados encontrou-se uma diferença de até 80% entre os programas, para uma mesma latitude. Ao comparar as iluminâncias geradas para as cinco cidades encontrou-se o maior erro para as regiões de latitude baixa, diminuindo à medida que a latitude aproxima-se dos 45°. As diferenças nas iluminâncias encontradas pelos programas ficam mais evidentes ao analisar o potencial de economia de energia elétrica em iluminação, com o uso da iluminação artificial apenas para a complementação da natural, onde para o programa Troplux o consumo é 50% maior que o resultante do Energyplus.

Palavras-chave: iluminação natural; simulação computacional.

ABSTRACT

In order to evaluate the energy performance of a building it is necessary to assess the use of daylight, as it can influence the thermal load of the building. Thus, the main objective of this study is to evaluate the illuminance levels calculated by four computer programmes, i.e., Energyplus, Daysim/Radiance, Troplux and Radiance. The analysis was performed by comparing the illuminance levels calculated for rooms with three different geometries (square, shallow and deep) in five cities: Belém, Brasília, Florianópolis, Geneva and Oslo; with latitudes ranging between 27°S and 59°N. By comparing the results it was found a difference of up to 80% amongst the programmes, for the same latitude. By comparing the illuminance levels for the five cities, the greatest error was found for the regions of low latitude, decreasing as the latitude becomes closer to 45°. The different illuminance levels obtained from the four programmes affect the potential for energy savings on lighting; when there is integration of daylight and artificial lighting; energy consumptions obtained from Troplux, for example, were 50% greater than those resulting from Energyplus.

Keywords: daylight; computer simulation.

1 INTRODUÇÃO

O uso da iluminação natural em ambientes de trabalho, juntamente com outros fatores, pode representar um grande potencial de economia de energia elétrica; conforme ilustrado no Gráfico 1, setores como o comercial e público utilizam cerca de 20% da energia elétrica em iluminação. Para tornar esta economia possível, é necessário que o projeto arquitetônico esteja adequado às condições de iluminação e clima do local, evitando a entrada direta dos raios do sol, que além de provocar ofuscamento nos usuários do ambiente, também aumenta o ganho de calor. O estudo desenvolvido por Ghisi e Tinker (2005) mostra que a adequação do tamanho da abertura pode reduzir consideravelmente o consumo de energia elétrica. Desta forma, observa-se a importância de analisar o ganho de calor juntamente com o potencial de economia gerada pelo uso da iluminação natural.

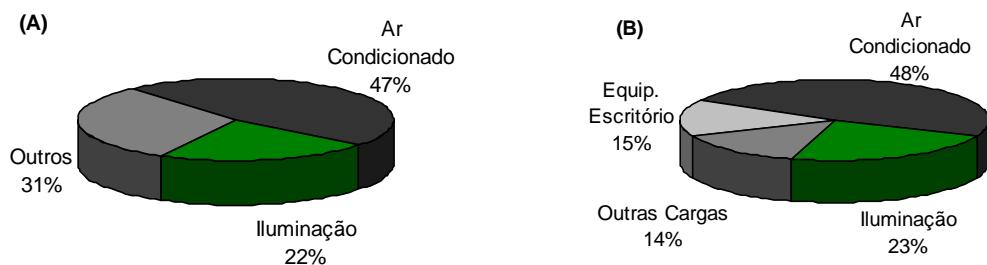


Gráfico 1 - Usos finais por setor no Brasil: (A) comercial; (B) público (Correia, 2007).

O programa Energyplus possibilita este tipo de análise, uma vez que realiza simulações computacionais termo-energéticas, e possibilita o controle do sistema de iluminação artificial de acordo com o nível de iluminação natural no ambiente. O programa Energyplus foi desenvolvido através da junção de dois outros programas, BLAST e DOE-2, do qual originou-se o cálculo da iluminação natural (ENERGYPLUS, 2007). A validação do algoritmo utilizado para o cálculo da iluminação natural foi realizada para o programa DOE-2; este processo foi realizado através da comparação do Daylight Factor (DF) entre os resultados do DOE-2, Superlite e medições realizadas no céu artificial do LBL (Lawrence Berkeley Laboratory). A partir destas comparações verificou-se uma diferença média de 15% entre os três métodos, com exceção das áreas muito próximas ou afastadas da abertura, que apresentaram um erro maior, devido ao método do fluxo dividido, usado para resolver as reflexões internas (WINKELMANN e SELKOWITZ, 1985). Nesta análise, no entanto, não foram verificados os níveis de iluminação gerados pelo programa, e como o DF é a relação entre a iluminância interna e externa, o uso deste índice não é o mais indicado para esta avaliação, uma vez que diferentes iluminâncias podem resultar em um mesmo DF.

Para o cálculo das iluminâncias internas, o programa Energyplus utiliza de um a dois pontos de referência, localizados na superfície de trabalho definida pelo usuário do programa. A partir destes são calculados os DFs, para cada um dos pontos e abertura, referentes as diferentes parcelas da luz natural: para a contribuição da luz vinda da abóbada celeste, direta e refletida e para a luz direta do sol, direta e refletida (ENERGYPLUS, 2007); já as reflexões internas são resolvidas através do método do fluxo dividido. Este processo é realizado para alguns dias do arquivo climático; após a definição do DF para cada ponto de referência, o cálculo da iluminância interna é então realizado através do DF e da iluminância externa, definida através do modelo desenvolvido por Perez et al. (1990).

O programa Daysim/Radiance, desenvolvido pelo *National Research Council Canada* (NRCC) e o *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, na Alemanha; foi elaborado com o intuito de calcular as iluminâncias para o período de um ano, de forma rápida e independente do tipo de céu (REINHART, 2006). Esta ferramenta de análise da iluminação natural tem como base o programa Radiance que simula a iluminação através do coeficiente da luz natural, e, assim como o Energyplus, no modelo de céu desenvolvido por Perez et al. (1990), para desta forma, possibilitar a simulação das iluminâncias sob qualquer condição de céu (REINHART e WALKENHORST, 2001). O programa Radiance, desenvolvido por Greg Ward no Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), baseia-se no método do raio traçado, para prever iluminâncias internas e a distribuição das luminâncias em ambientes de geometria complexa, sob qualquer condição de céu (REINHART, 2006).

O programa Troplux procura simular de forma satisfatória a iluminação natural nos trópicos. Segundo Cabús (2005), o Troplux é baseado em três conceitos fundamentais: o método Monte Carlo, o método do raio traçado e, assim como o Daysim/Radiance, o conceito de coeficientes de luz natural. O método do raio traçado é a técnica onde raio traçado segue o caminho de um raio entre superfícies. Sua principal vantagem consiste na possibilidade em dar soluções teóricas simples para geometrias complexas (CABÚS, 2005).

O modelo desenvolvido por Perez et al. (1990), utilizado pelos programas Energyplus e Daysim/Radiance, propõe o uso mais amplo dos dados solares, extrapolando-os em dados de iluminação. Segundo os mesmos autores, a partir da combinação de três parâmetros básicos pode-se construir um espaço tridimensional que representa todas as possibilidades de condições do céu, desde muito claro até o céu encoberto escuro. As coordenadas para a delimitação deste espaço são: ângulo zenital, índice de brilho do céu e o índice de claridade do céu, definidos em Perez et al. (1990).

2 OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo comparar as iluminâncias internas e externas obtidas por meio de simulações computacionais realizadas em quatro programas: Energyplus, Daysim/Radiance, Troplux e Radiance; e verificar a influência dos resultados destas simulações no cálculo do consumo de energia em iluminação artificial quando utilizada em conjunto com a natural.

3 MÉTODO

Esse trabalho avalia o cálculo do nível da iluminação natural no ambiente interno realizado por quatro programas que simulam a iluminação natural. Esta análise será realizada em três etapas: comparação entre as iluminâncias internas simuladas; comparação entre as iluminâncias externas simuladas e as reais; e, a comparação do consumo de energia em iluminação resultante a partir de cada um dos programas. Este procedimento será detalhado a seguir.

3.1 Avaliação do cálculo da iluminação natural

Uma vez que a disponibilidade da luz natural é um fator importante para um projeto de iluminação eficiente, os valores das iluminâncias obtidas através das simulações podem influenciar nas decisões a serem tomadas durante a elaboração deste projeto. Assim, é importante verificar as iluminâncias internas geradas por programas de simulação que utilizam métodos de cálculo diferentes.

Para a análise das iluminâncias internas calculadas pelos programas Energyplus, Daysim/Radiance, Troplux e Radiance, serão realizadas simulações para o clima de Florianópolis, a partir de quatro modelos. Estas simulações serão realizadas para três salas com paredes e teto brancos, com refletância igual a 0,85 e piso bege, com refletância igual a 0,60; e para uma sala em que as superfícies não apresentam refletância ($\rho=0$), isto para verificar se a diferença nos valores das iluminâncias é resultante de possíveis erros no cálculo da reflexão interna. Os modelos possuem dimensões diferentes, sendo eles: uma sala quadrada, na proporção de 1:1 (5m x 5m x 3m); uma sala retangular rasa, com proporção de 2:1 (10m x 5m x 3m), com abertura na maior fachada e uma sala retangular profunda, com proporção de 1:2 (5m x 10m x 3m), com abertura na menor fachada; os modelos estão representados na Figura 1. Estes, possuem a abertura na fachada voltada para o sul, com percentual de janela na fachada (PJF) igual a 50%, nas aberturas considerou-se o uso de vidro claro de 3mm, com transmissividade a luz visível igual a 0,88. Na Figura 1 estão representados os dois pontos de referência, localizados a 0,75m do piso, a partir dos quais serão realizadas as simulações e as análises da iluminância interna. As simulações serão realizadas para o período referente ao horário de trabalho, das 8 às 18 horas, para o céu encoberto e em três datas: solstício de inverno e verão e equinócio, ilustrando a trajetória aparente do sol. O cálculo das iluminâncias realizado pelo Energyplus e Daysim/Radiance parte dos dados presentes no arquivo climático, enquanto o Troplux e o Radiance realizam as simulações através de modelos para cada tipo de céu, necessitando apenas da latitude do local onde a simulação será realizada. Os programas Troplux e Radiance realizam a simulação especificamente para determinado tipo de céu, enquanto os outros programas realizam a simulação de forma dinâmica, de acordo com os dados do arquivo climático, resultando em um comportamento da luz mais próximo do real, com grande variabilidade da mesma. Assim, para poder realizar as

comparações entre os quatro programas, serão escolhidos os dias de céu encoberto. Onde para o Troplux e Radiance será realizada a simulação a partir do céu encoberto definido pela CIE; enquanto para o Energyplus e Daysim/Radiance, serão escolhidos os dias com claridade do céu até 1,2, o que define como o céu encoberto.

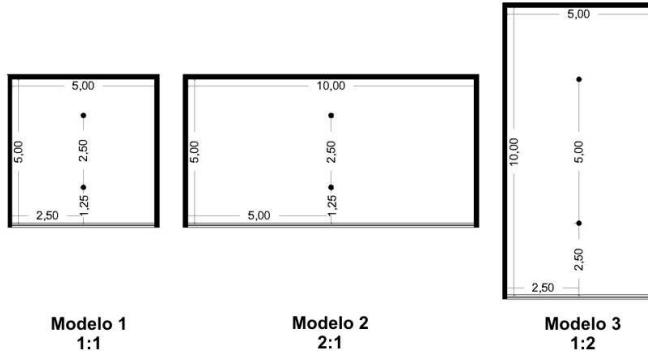


Figura 1 - Dimensões dos modelos estudados e localização dos pontos de referência.

Com base nestas simulações serão comparadas as iluminâncias internas para cada modelo, e cada um dos pontos de referência, para a cidade de Florianópolis. Após a verificação da influência da forma da sala na diferença entre os valores das iluminâncias internas; analisou-se a influência da latitude no cálculo destes valores. Optou-se por esta verificação uma vez que o modelo desenvolvido por Perez et al. (1990), para o cálculo da iluminância externa horizontal, é baseado em dados coletados apenas em cidades com latitude próximas a 45°. Desta forma, a partir do modelo de proporção 1:1, repetiu-se o processo de simulação para cinco cidades: Belém, Brasília, Florianópolis, Genebra e Oslo. A Tabela 1 apresenta as latitudes das cidades e os arquivos climáticos utilizados nas simulações.

Tabela 1 - Cidades e latitudes simuladas e arquivos climáticos utilizados

Cidade	Latitude	Arquivo Climático	Fonte
Belém	1°22'S	BelemTRY1964_05CSV	LabEEE, 2006.
Brasília	15°52'S	BrasiliaTRY1962_05CSV	LabEEE, 2006.
Florianópolis	27°40'S	FlorianopolisTRY1963_05CSV	LabEEE, 2006.
Genebra	46°15'N	CHE_Geneva_IWEC	EERE, 2007.
Oslo	59°54'N	NOR_Oslo.Fornebu_IWEC	EERE, 2007.

3.2 Análise da iluminação externa horizontal difusa

Devido às diferenças existentes nos valores das iluminâncias internas resultantes das simulações dos quatro programas, optou-se por comparar os valores das iluminâncias externas horizontais reais com os valores simulados, buscando identificar quais valores são mais próximos dos reais.

Nesta comparação serão utilizados os valores de iluminância externa resultantes das simulações de três programas: Energyplus, Daysim/Radiance e Troplux; não serão utilizadas as simulações do Radiance pois estas ainda não foram concluídas. Para estas simulações foram utilizados dados com os mesmos parâmetros de céu da análise anterior. As iluminâncias externas horizontais reais (Eh) foram coletadas através da Estação de Medição de Iluminação Natural de Florianópolis (EMIN-Floripa), entre os anos de 2002 e 2003, na cidade de Florianópolis; para a comparação foram utilizados apenas os dados de céu encoberto coletados nestes anos.

3.3 Avaliação do consumo de energia elétrica em iluminação artificial

Uma vez que a necessidade do uso da iluminação artificial depende do nível da iluminação natural no ambiente, os valores das iluminâncias resultantes das simulações vão influenciar na previsão do consumo de energia para este uso. Assim, esta etapa do trabalho traz a comparação do consumo anual de energia elétrica em iluminação artificial como resultado das iluminâncias obtidas através de cada programa.

Os programas Energyplus e Daysim/Radiance, além de calcularem as iluminâncias para os pontos de referência para o período de um ano, também fornecem dados de consumo de energia para determinado sistema de controle. Nestas simulações optou-se pelo controle dimerizado da iluminação artificial, com dois sistemas de controle, uma para cada metade da sala, onde cada possui acionamento do sistema de iluminação artificial apenas nos horários de trabalho, das 8 às 18 horas.

Para o cálculo do consumo de energia em iluminação artificial dos dois programas que trabalham com simulação estática da iluminação natural, utilizou-se o percentual de aproveitamento da luz natural (PALN), método de cálculo desenvolvido por Souza (2003), para estimar a quantidade de energia economizada com a utilização da luz natural. Para este cálculo foi necessário realizar simulações para cada período do ano (solstício e equinócio) e para os três tipos de céu (encoberto, claro e intermediário). Este método é dado através do período em que a luz natural é suficiente para atender as necessidades da tarefa a ser realizada no local, ou para complementar a luz artificial, de acordo com a Equação 1.

$$PALN = PALN_S + PALN_C \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

PALN - Percentual de aproveitamento da luz natural;

$PALN_S$ - Percentual de aproveitamento da luz natural por substituição da iluminação artificial;

$PALN_C$ - Percentual de aproveitamento da luz natural por complementação da iluminação artificial.

No sistema de controle da iluminação artificial dimerizável, o fator de economia dependerá da iluminância média da luz natural e das características do sistema, tais como: potências máxima e mínima e níveis de iluminância máximo e mínimo, estes parâmetros são relacionados na Equação 2, para o cálculo do PALN de complementação; no caso de substituição total da luz artificial o sistema é desligado.

$$PALN_C = \frac{\sum_0^n \left\{ 1 - \frac{P_{\min}}{P_{\max}} - \left[\frac{(P_{\max} - P_{\min})}{(E_{\max} - E_{\min})} \right] * \frac{(E_P - E_{LN} - E_{\min})}{P_{\max}} \right\}}{n} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$PALN_C$ - Percentual de aproveitamento da luz natural por complementação da iluminação artificial;

n - Número de horas analisadas;

P_{\min} - Potência mínima consumida pelo sistema, [W];

P_{\max} - Potência máxima consumida pelo sistema, [W];

E_{\min} - Iluminância mínima fornecida pelo sistema, [lux];

E_{\max} - Iluminância máxima fornecida pelo sistema, [lux];

E_P - Iluminância de projeto, [lux];

E_{LN} - Iluminância da luz natural, [lux].

Como estes programas realizam as simulações através dos tipos de céu e não a partir de arquivos climáticos, é necessário fazer a ponderação do PALN. Assim, será calculado o percentual de aproveitamento da luz para cada horário, e feita a ponderação de acordo com a probabilidade de ocorrência de cada tipo de céu para cada uma das estações do ano de acordo com a Equação 3.

$$PALN_P = (PALN_{CC} \cdot \rho_{CC}) + (PALN_{CP} \cdot \rho_{CP}) + (PALN_{CE} \cdot \rho_{CE}) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$PALN_P$ - Percentual de aproveitamento da luz natural ponderado;

$PALN_{CC}$ - Percentual de aproveitamento da luz natural com céu claro;

$PALN_{CP}$ - Percentual de aproveitamento da luz natural com céu parcialmente encoberto;

$PALN_{CE}$ - Percentual de aproveitamento da luz natural com céu encoberto;

ρ_{cc} - Probabilidade de ocorrência de céu claro;

ρ_{cp} - Probabilidade de ocorrência de céu parcialmente encoberto;

ρ_{ce} - Probabilidade de ocorrência de céu encoberto.

No estudo de Souza e Pereira (2004), são apresentadas as probabilidades de ocorrência dos tipos de céu para cada mês, necessários para a ponderação do PALN, para a cidade de Florianópolis. A partir destes dados foram calculadas as porcentagens de ocorrência de cada tipo de céu para cada mês do ano, mostradas no Gráfico 2.

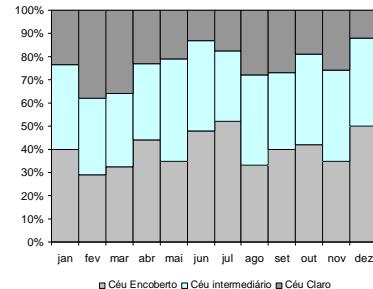


Gráfico 2 - Probabilidade de ocorrência dos tipos de céu em Florianópolis (Souza e Pereira, 2004)

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Avaliação do cálculo da iluminação natural interna

Procurou-se avaliar as iluminâncias obtidas através de simulações comparando os resultados de quatro programas, Energyplus, Daysim/Radiance, Troplux e Radiance, para a cidade de Florianópolis. As comparações são apresentadas nos Gráficos 3 a 5, mostrando os resultados das iluminâncias internas dos dois pontos de referência, e o erro encontrado entre os quatro programas.

O Gráfico 3 mostra os resultados obtidos pelos quatro programas, para a sala clara de proporção 1:1, para as três datas simuladas, sendo: o gráfico A referente ao solstício de verão, o B para o equinócio e o gráfico C para o solstício de inverno, enquanto as diferenças encontradas entre eles estão representadas no gráfico D. No Gráfico 3, onde estão representadas as iluminâncias, percebe-se que as iluminâncias diminuem de acordo com a data da simulação, onde a diferença é de aproximadamente 4klux entre o verão e o inverno, para os programas Energyplus e Daysim/Radiance, e de 2klux para os programas Troplux e Radiance. No Gráfico 3D observa-se que a menor variação ocorre entre os dois programas que realizam simulação através do arquivo climático (Energyplus e Daysim/Radiance), com uma diferença próxima aos 10% na maior parte do dia; seguida pela comparação entre os dois programas que utilizam tipos de céu. Ao comparar programas com dois métodos de simulação diferentes os erros são superiores a 50%; as diferenças encontradas entre as iluminâncias são próximas para as três datas. Outro fator a ser observado é o aumento da diferença das iluminâncias à medida que a altitude do sol diminui.

Nos Gráfico 3A, 3B e 3C, a linha tracejada representa 500 lux, iluminância necessária para a realização das tarefas. Desta forma, para esta sala, apenas os programas Troplux e Radiance apresentaram iluminâncias abaixo deste valor, períodos onde se faz necessário o uso da iluminação artificial para complementar a natural. Esta complementação é necessária para o segundo ponto de referência, localizado na parte da sala afastada da abertura.

Tendo em vista que uma das dificuldades dos programas de simulação da iluminação natural é a reflexão interna, simulou-se este mesmo modelo, de proporção 1:1, com as superfícies internas com refletância igual a zero. Os resultados apresentados na Gráfico 4 mostram iluminâncias abaixo das encontradas para o modelo anterior, principalmente para ponto de referência afastado da abertura; no entanto, a diferença encontrada entre os programas continua alta. No Gráfico 4B pode-se verificar que o erro entre os programas Energyplus e Daysim/Radiance varia dm torno de 40%, enquanto no primeiro modelo era de 10%. Comparando o resultado destes dois modelos percebe-se que as iluminâncias obtidas através do Energyplus obtiveram a maior queda com a retirada da parcela da iluminação natural refletida. No entanto, mesmo sem esta parcela, os valores encontrados pelo

Energyplus e Daysim/Radiance são de 40 a 80% maiores que os encontrados pelos programas que utilizam modelos de céu.

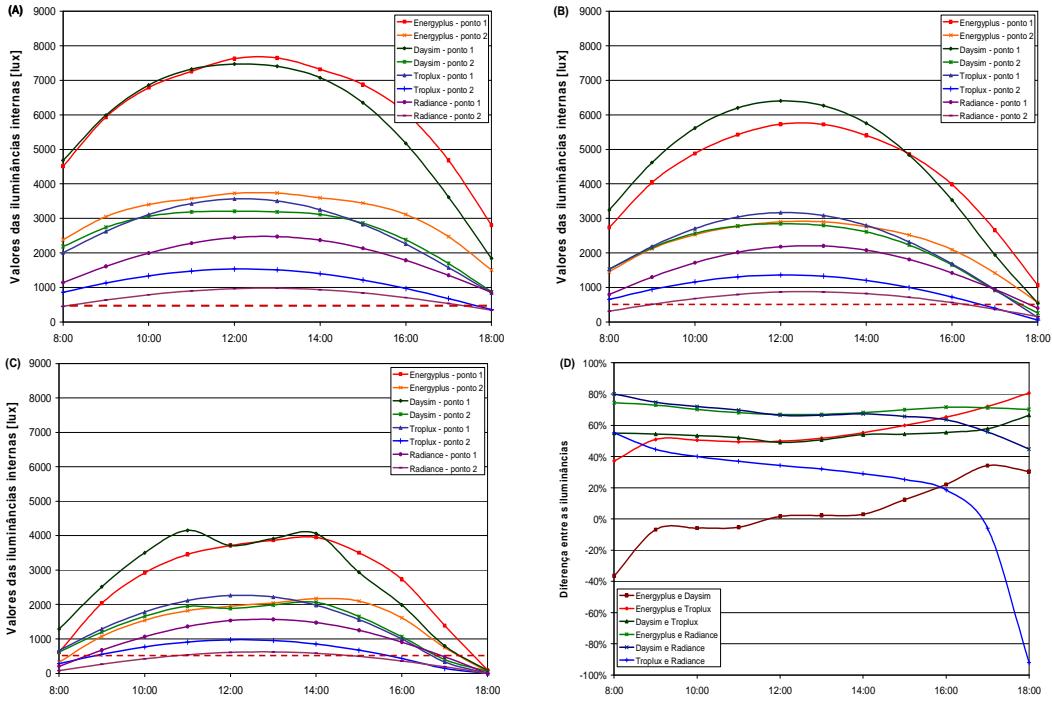


Gráfico 3 - Valores das iluminâncias internas para o modelo de proporção 1:1 (5m x 5m x 3m) e altas refletâncias: (A) solstício de verão; (B) equinócio, (C) solstício de inverno, e (D) diferença encontrada entre os programas.

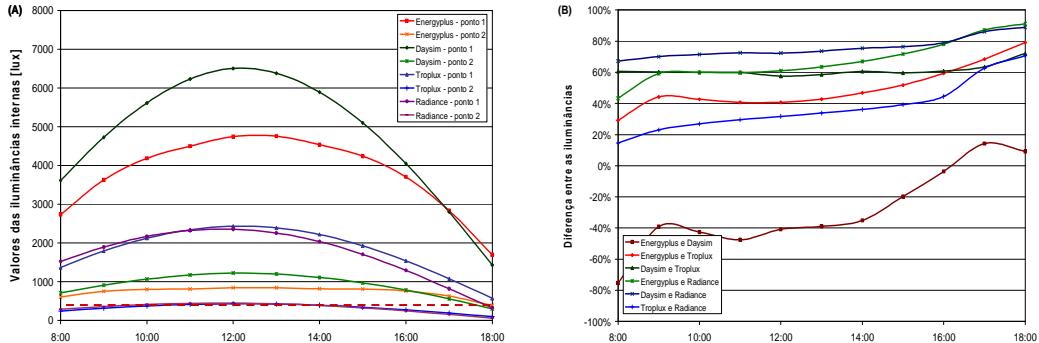


Gráfico 4 - Valores das iluminâncias internas para o modelo de proporção 1:1 (5m x 5m x 3m) e refletância igual a zero: (A) solstício de verão; (B) diferença média entre os programas.

Assim, como a reflexão interna não influencia nas diferenças existentes entre os resultados dos programas, as simulações apresentadas a seguir foram realizadas para o modelo da sala com reflexão interna. A sala de proporção 2:1, onde a abertura está na maior fachada, as iluminâncias encontradas são cerca de 1klux maiores que as do modelo 1, com diferenças entre os programas também semelhantes ao modelo anterior.

A sala com proporção de 1:2, cujos resultados são apresentados no Gráfico 5, possui os menores níveis de iluminação e as maiores variações das iluminâncias entre um programa e outro. Neste modelo, as diferenças entre as iluminâncias encontradas através de cada programa de simulação são diferentes para os dois pontos de referência. As diferenças encontradas são maiores para o ponto de referência dois, afastado da abertura, com exceção da comparação entre os programas Daysim/Radiance e Troplux, onde a diferença é menor para o segundo ponto de referência, ambos os programas utilizam o método do raio traçado para o cálculo. A comparação entre os programas Daysim/Radiance e Radiance, que utilizam o mesmo método de cálculo, não apresenta diferença no erro entre os dois

pontos de referência. Neste modelo os resultados do Troplux e Radiance estão abaixo da iluminância necessária para a realização das tarefas durante todo o período do dia.

O Gráfico 5 mostra uma grande diferença entre as iluminâncias obtidas pelos programas de simulação a partir de modelos dinâmicos de céu e os que utilizam simulação estática da iluminação natural. As iluminâncias encontradas através dos programas que utilizam o modelo desenvolvido por Perez são, em média, 60% maiores que aquelas encontradas através de modelos de simulação estática; estas diferenças são ainda maiores para os períodos em que a altitude do sol é menor, este fato pode ser notado nos gráficos, próximo ao final da tarde. Outro fator a ser observado é o de que a sala com proporção de 1:1 possui, em geral, as menores diferenças em relação às outras salas; enquanto a sala de proporção 1:2 possui as maiores diferenças para o ponto de referência 2.

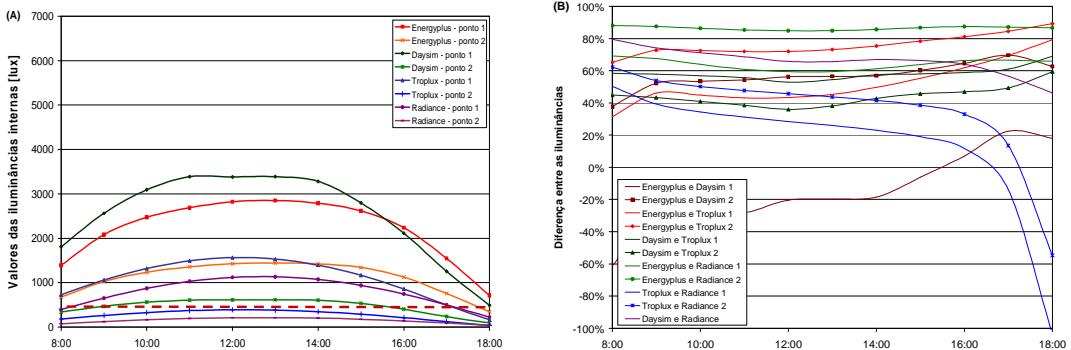


Gráfico 5 - Valores médios da iluminância interna para o modelo de proporção 1:2 (5m x 10m x 3m), e diferença encontrada entre eles.

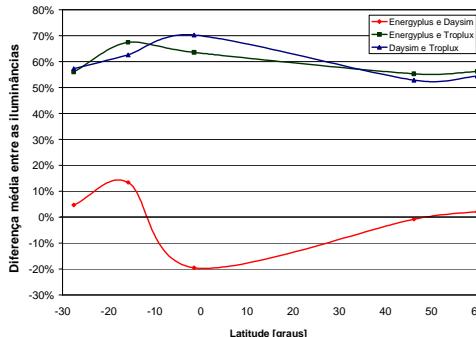


Gráfico 6 - Diferença média entre as iluminâncias calculadas pelos três programas de simulação.

Como nos gráficos anteriores, ao comparar os resultados das simulações realizadas para as cinco cidades, as diferenças entre os programas Energyplus e Daysim/Radiance são as menores, enquanto quando comparados ao programa Troplux o erro médio é semelhante e varia de 50 a 70%. O Gráfico 6 mostra ainda que, de forma geral, o erro é maior para Belém, cidade mais próxima da linha do Equador, decrescendo à medida que a latitude aumenta; até chegar a cidade de Genebra, com latitude próxima a 45° (latitude utilizada para elaboração do modelo de Perez et al., 1990, para o cálculo da iluminação horizontal externa), onde os erros são menores, e voltam a aumentar para a cidade de Oslo, com latitude próxima aos 60°.

4.2 Análise da iluminação externa horizontal difusa

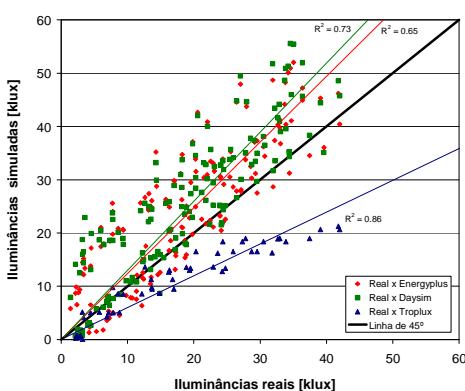


Gráfico 7 - Correlação entre as iluminâncias externas reais e as simuladas

O Gráfico 7 mostra a comparação das iluminâncias externas reais, de Florianópolis, com as iluminâncias externas resultantes das simulações. A partir do gráfico nota-se a clara diferença entre as iluminâncias encontradas pelo Troplux e os outros dois programas. Ao analisar as iluminâncias do Troplux percebe-se que estas estão abaixo das reais, uma vez que os pontos se afastam da linha de 45°, que representa correlação perfeita entre os valores. Os resultados das iluminâncias do Energyplus e do Daysim/Radiance são próximos entre si, mas elevados quando comparados com os valores reais. No Gráfico 7 estes dois programas apresentam parte da nuvem de pontos próxima dos valores reais; no entanto, a maior parte deles tem as iluminâncias superiores aos valores reais. Nota-se

também a alta dispersão destes valores, onde a amplitude da nuvem dos pontos é de aproximadamente 20klux.

Nesta comparação são utilizados dados que possuem origens diferentes, sendo elas: modelo de céu homogêneo, utilizado pelo Troplux; modelo de céu dinâmico, utilizado pelo Energyplus e Daysim/Radiance, que utiliza o arquivo climático de Florianópolis; e dados reais de 2002 e 2003. Apesar deste fator, que em muito explica a diferença apresentada no Gráfico 7, todos os modelos representam uma mesma condição de céu e, são utilizados para dar uma resposta quanto a disponibilidade da luz natural para a resolução destas questões em projetos arquitetônicos, chegando a diferentes resultados que em geral diferem da situação que será encontrada em campo.

4.3 Avaliação do consumo de energia elétrica em iluminação artificial

Sabendo que a necessidade do uso da iluminação artificial se dá pelo nível de iluminação natural no ambiente e tarefa a ser realizada, então, esta diferença nos valores simulados para a iluminação natural influenciará nas análises de consumo de energia.

O cálculo do consumo de energia, para os programas Troplux e Radiance, foi baseado no percentual de aproveitamento da luz natural (PALN), onde considerou-se a probabilidade de ocorrência de cada tipo de céu, em cada mês do ano, para a cidade de Florianópolis. Como a sala analisada possui dois pontos de referência e, consequentemente, acionamento separado da luz artificial nas duas metades da sala, o PALN foi calculado para cada metade da sala. Os resultados obtidos através das simulações realizadas no Troplux mostraram julho como o mês de menor aproveitamento da luz natural, com aproveitamento da luz em 89% do horário de trabalho na parte da sala próxima à abertura e 83% na segunda metade da sala. Para o Radiance, julho também possuía o menor PALN, com um índice de 87% próximo à abertura e 77% afastado da mesma. Para os programas Energyplus e Daysim/Radiance este processo não é necessário, uma vez que os mesmos já fornecem os dados de consumo. O programa Energyplus analisa também a carga térmica gerada iluminação artificial, no entanto, neste trabalho será considerado apenas o consumo de energia elétrica utilizado na iluminação do ambiente.

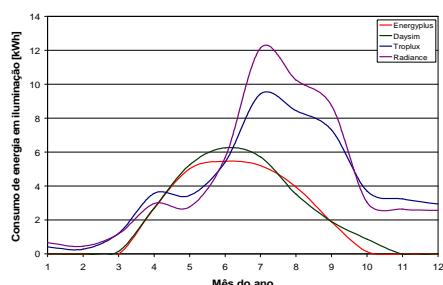


Gráfico 8 - Consumo de energia elétrica em iluminação artificial.

O Gráfico 8 mostra a comparação do consumo de energia elétrica, calculado a partir das iluminâncias obtidas através de cada um dos programas de simulação. Ao comparar os quatro programas, observa-se a grande diferença existente entre os resultados do consumo de energia em iluminação entre os programas que utilizam modelos de céu estáticos (Radiance e Troplux) e aqueles que utilizam modelos de céu dinâmicos, a partir do arquivo climático (Daysim/Radiance e Energyplus).

Entre os programas Energyplus e Daysim/Radiance, o consumo é maior para o programa Daysim/Radiance para quatro meses do ano, enquanto nos meses de janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro, não há consumo de energia em iluminação para nenhum destes dois programas. Como observado nos gráficos anteriores, os programas Troplux e Radiance apresentaram, em todas as simulações, valores abaixo dos 500 lux, estabelecidos como iluminância de projeto; e, desta forma, resultaram em um consumo de energia maior. Para o programa Troplux o consumo anual é 50,7% maior que o calculado pelo Energyplus, 46,5% maior que o do Daysim/Radiance, e 7% menor que os obtidos pelo Radiance. O consumo de energia encontrado para os resultados do Troplux é superior ao do Radiance apenas para os meses de inverno.

5 Conclusões

Este trabalho mostra uma comparação das iluminâncias calculadas a partir de quatro programas de simulação - Energyplus, Daysim/Radiance, Troplux e Radiance. A partir das comparações verificou-se que os valores das iluminâncias têm maior relação com o modelo de céu do que com o método de cálculo utilizado pelos programas. Isso percebe-se ao analisar os resultados do programa Daysim/Radiance, que apresenta iluminâncias mais próximas às encontradas pelo programa

Energyplus, que utiliza o mesmo modelo de céu, do que às encontradas pelo Radiance, programa com o mesmo método de cálculo do Daysim/Radiance.

Desta forma as simulações das iluminâncias apresentam-se em dois grupos: o primeiro, com os valores encontrados a partir das simulações que utilizam o modelo de céu estático, usado pelo Troplux e Radiance. Os resultados para as iluminâncias destes programas apresentaram valores sempre abaixo dos encontrados através dos outros programas. Na comparação com os dados reais os valores das iluminâncias externas, fornecidas pelo programa Troplux, se mostraram bem abaixo dos dados encontrados em Florianópolis, e apenas os valores abaixo a 10klux estão próximos dos reais.

No segundo grupo, os programas baseados no modelo dinâmico de céu (Perez et al., 1990), apresentaram em todas as simulações resultados altos para as iluminâncias, quando comparados com os outros programas. Desta forma, resultam em uma previsão do consumo de energia elétrica consideravelmente menor que o obtido através dos cálculos realizados a partir das iluminâncias simuladas no Troplux e Radiance. Ao comparar as iluminâncias externas destes programas com as reais, observa-se a grande variabilidade dos mesmos, que apresentam valores até 20 klux maiores que os reais e, também, resultados próximos às iluminâncias reais.

6 Referências

- CABÚS, Ricardo C.. TropLux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações. In: IV Encontro Latino-Americano e VIII Encontro Nacional Sobre Conforto no Ambiente Construído, Maceió, 2005, **Anais...** Maceió, ENCAC-ELAC 2005. CD-ROM.
- CORREIA, Paulo. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa na Classe Comercial – AT.** Ecoluz , 2007 Disponível em: <http://www.eletrobras.com/pci/main.asp> (acessado em abril de 2007).
- ENERGYPLUS. **EnergyPlus Engineering Reference.** The Reference to EnergyPlus Calculations. EnergyPlus, set., 2007.
- GHISI, Enedir; TINKER, John A.. An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. **Building and Environment**, v. 40, nº 1, p 51-60, jan. 2005.
- PEREZ, Richard; PIERRE, Ineichen; SEALS, Robert; MICHALSKY, Joseph; STEWART, Ronald. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, nº 5, p 271-289, 1990.
- REINHART, Christoph F.. **Tutorial on the use of Daysim Simulations for Sustainable Design.** Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, ago. 2006.
- REINHART, Christoph F.; WALKENHORST, Oliver. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. **Energy and Buildings**, v. 33, nº 7, p 683-697, set. 2001.
- SOUZA, Marcos B. **Potencialidade de Aproveitamento da Luz Natural Através da Utilização de Sistemas Automáticos de Controle para Economia de Energia Elétrica.** Tese de pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- SOUZA, Roberta V. G. DE; PEREIRA, Fernando O. R.. Primeira estação de medição de iluminação natural em território brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento. **Ambiente Construído**, v.4, nº 3, p. 79-94, Porto Alegre, jul.-set., 2004.
- WINKELMANN, Frederick C.; SELKOWITZ, Stephen. Daylighting Simulation in the DOE-2 Building energy Analysis Program. **Energy and Buildings**, v. 8, nº 4, p. 271-286, dez. 1985.
- Laboratório de eficiência energética em Edificações. **Arquivos Climáticos.** Disponível em www.labeee.ufsc.br, acessado em set. 2006.
- Energy Efficiency and Renewable Energy. Building Technologies Program - **Weather Data.** Disponível em www.eere.energy.gov/buildings/energyplus, acessado em maio, 2007.