



COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE ILUMINAÇÃO OBTIDOS ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS NO SOFTWARE APOLUX, USANDO OS 15 MODELOS DE CÉU ADOTADOS PELA CIE

**Anderson Claro (1); Lucas Arango Díaz (2); Agostinho de Vasconcelos Leite da
Cunha (3); Greici Ramos (4)**

- (1) Departamento de Arquitetura e Urbanismo – PósArq – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail: claro.ander@gmail.com
- (2) Departamento de Arquitetura e Urbanismo – PósArq – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail: lucas.arango.diaz@hotmail.com
- (3) Departamento de Arquitetura e Urbanismo – PósArq – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail: arq_cunha2003@yahoo.com.br
- (4) Departamento de Engenharia Civil – PPEGC – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail: greiciramos@gmail.com

RESUMO

Na atualidade, as ferramentas de cálculo de iluminação natural em arquitetura devem oferecer facilidades na modelagem e curtos tempos de cálculo sem abrir mão da precisão e confiabilidade dos resultados. Um fator que interfere na precisão é a definição das luminâncias no céu segundo a latitude e as condições climáticas no lugar de estudo. Este artigo apresenta cálculos luminosos realizados no software Apolux usando os 15 modelos de céu adotados pela CIE. Dentro da disciplina de Simulação Computacional oferecida no programa de pós-graduação em arquitetura da UFSC - PósARQ, foram realizados cálculos através de simulações computacionais para o último pavimento do Prédio de escritórios Primavera localizado na cidade de Florianópolis (latitude 27° 30' S e longitude 48° 30' W). Foram realizadas 90 simulações no total, divididas em duas datas (21 Junho e 21 dezembro) e três horários (9:00, 12:00, 15:00 horas). Os resultados foram analisados no plano de trabalho (75 cm do chão), a partir de três tipos de gráficos: 1) Gráficos qualitativos, que mostram a distribuição do nível luminoso no plano de trabalho para cada uma das simulações. 2) Análise da suficiência luminosa, onde se resume o resultado das simulações de uma data e hora específica, e se mostra a suficiência luminosa no plano de trabalho para cada tipo de céu, segundo os níveis de iluminância definidos em faixas de insuficiente até excessivo. 3) Iluminâncias no eixo longitudinal, que mostram a variação do nível luminoso ao longo do eixo longitudinal no modelo estudado para os 15 modelos de céu. Os resultados mostram grande variabilidade nas condições luminosas do espaço segundo o tipo de céu simulado. As conclusões apontam à necessidade de incluir simulações luminosas dinâmicas que ajudem a tomar decisões no design das fachadas segundo os tipos de céu predominantes.

Palavras-chave: Iluminação natural; simulação computacional; tipos de céu.

1 INTRODUÇÃO

A iluminação natural tem importância cada vez maior no projeto de arquitetura, seja pela qualidade da luz e pelo conforto, benefícios psicológicos e fisiológicos, redução do consumo de energia elétrica, paisagismo, etc., mas a quantidade de variáveis a serem consideradas, de forma a compreender o fenômeno, é muito grande.

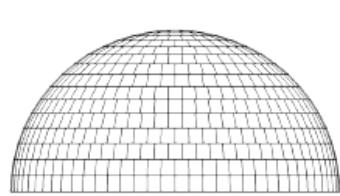
A descrição do fenômeno da luz natural é complexa, pois ela muda com a hora do dia, com as estações do ano, com as nuvens e com o microclima. Ao avaliá-la, é preciso considerar a localização geográfica, pois ela se altera relativamente à latitude e à orientação. Com relação ao entorno, outros elementos acentuam seu comportamento, como área construída, tamanho e altura das edificações vizinhas, orientação das fachadas, bem como o controle solar e as características de transmissividade dos materiais (Pereira, 2009, p. 03).

A simulação da iluminação natural permite ao arquiteto prever como ficará o ambiente construído, seja por meio de modelos físicos em escala (maquetes) ou pelo computador, contribuindo de diversas formas na tomada de decisões durante o processo projetual. “(...) as ferramentas de simulação acabam tornando-se indispensáveis para a representação do comportamento do fenômeno (...)” (Pereira, 2009, p. 03).

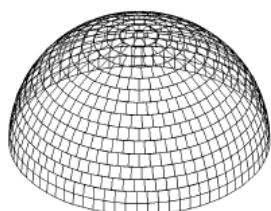
Naturalmente, com o uso cada vez maior da tecnologia no desenvolvimento de projetos, a utilidade dos aplicativos computacionais para simulação da iluminação natural tornou-se mais patente, sendo uma maneira de predizer e avaliar possíveis problemas de luminosidade no ambiente com facilidade, rapidez e precisão cada vez maior sob diferentes situações, facilitando o estudo do espaço e aprimorando o processo de projecção ao relacionar o aproveitamento da luz natural com a eficiência energética, otimizando o consumo da iluminação artificial.

Do ponto de vista do conforto ambiental é importante avaliar o comportamento da luz natural em ambientes internos, o que, muitas vezes, é uma tarefa complexa. Neste sentido, a utilização de softwares de simulação pode simplificar a tarefa de ajustar idéias alternativas nas diversas fases do projeto (Carvalho, 2009, p. 01-02).

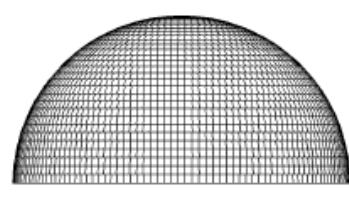
A simulação computacional tem como base os conhecimentos físicos e óticos que definem o estado da abóbada celeste e do sol. A abóbada é dividida em várias parcelas (Figura 1), conforme o grau de precisão da distribuição de luminâncias, e os resultados são obtidos através das iterações sucessivas da energia luminosa em função da inter-reflexão e transmissão da luz.



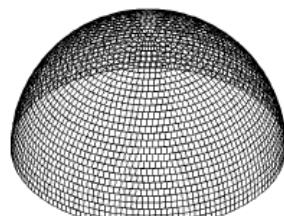
Vista da resolução de visibilidade de 15 faixas, em 1490 parcelas.



Vista perspectivada da resolução de visibilidade de 15 faixas, em 1490 parcelas.



Vista da resolução de visibilidade de 30 faixas, em 5902 parcelas.



Vista perspectivada da resolução de visibilidade de 30 faixas, em 5902 parcelas.

Figura 1 - Divisão da abóbada celeste (Fonte: Carvalho, 2009, p. 23)

As equações padronizadas pelos comitês e institutos científicos (CIE, IESNA, ABNT) e usadas para descrever o comportamento luminoso da fonte consideram as variáveis físicas e climatológicas (condições do ar, turvamento sob céu sem nuvens, abóbada de cálculo limpa ou encoberto, parâmetros temporais em relação ao período do ano, orientação, entre outros) (Pereira, 2009, p. 04).

Os softwares de simulação baseados no comportamento do fenômeno físico da luz estão propostos para facilitar o entendimento da luz e o comportamento dos materiais através de cálculos complexos e interpolações da luz natural (Carvalho, 2009, p. 16).

Foi em meados do século XX que efetivamente se deu início aos estudos de modelos numéricos de céus para caracterização das distribuições de luminâncias para diferentes condições meteorológicas. Conforme Pereira (2009, p. 16-17), resumidamente, a evolução destes estudos tem início com a esfera uniforme com luminância unitária de Lambert; Moon e Spencer (1942) caracterizam a distribuição de luminâncias para céu encoberto; Kittler (1967) para céu claro; Littlefair (1981) para céu intermediário; Perraudeau (1988) dispôs cinco categorias de céu; Perez, Kittler e Darula (1997) classificaram quinze categorias de céu.

A Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) em 2002, com base nos estudos de Perez, Kittler e Darula (1997), utilizou esta classificação conforme descrição mostrada abaixo (fonte: ISO 15469:2004 Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky):

- Tipo 1: Céu encoberto padrão, graduação intensa de luminâncias em direção ao zênite, com uniformidade nos azimutes.
- Tipo 2: Céu encoberto, graduação intensa de luminâncias em direção ao zênite, com suave brilho em direção ao Sol.
- Tipo 3: Céu encoberto, moderadamente graduado, com uniformidade nos azimutes.
- Tipo 4: Céu encoberto, moderadamente graduado, com suave brilho em direção ao Sol.
- Tipo 5: Céu de Luminância Uniforme.
- Tipo 6: Parcialmente nublado, sem graduação de luminâncias em direção ao zênite, com suave brilho em direção ao Sol.
- Tipo 7: Parcialmente nublado, sem graduação de luminâncias em direção ao zênite, com região circunsolar brilhante.
- Tipo 8: Parcialmente nublado, sem graduação de luminâncias em direção ao zênite, com coroa solar distinta.
- Tipo 9: Parcialmente nublado, com o sol obscurecido.
- Tipo 10: Parcialmente nublado, com região circunsolar brilhante.
- Tipo 11: Céu Branco-Azul, com coroa solar distinta.
- Tipo 12: Padrão Céu Claro CIE, com luminâncias de baixa turbidez.
- Tipo 13: Padrão Céu Claro CIE, com atmosfera poluída.
- Tipo 14: Céu Turvado Sem Nuvens, com ampla coroa solar.
- Tipo 15: Céu Turvado Branco-Azul, com ampla coroa solar.

Estas definições de padronização de céu, aliadas a outros parâmetros tais como localização geográfica e data, são importantes para uma maior precisão e confiabilidade das avaliações qualitativas e quantitativas, de forma que os projetistas possam verificar de antemão a qualidade da luz no ambiente e desempenho energético das suas decisões de projeto.

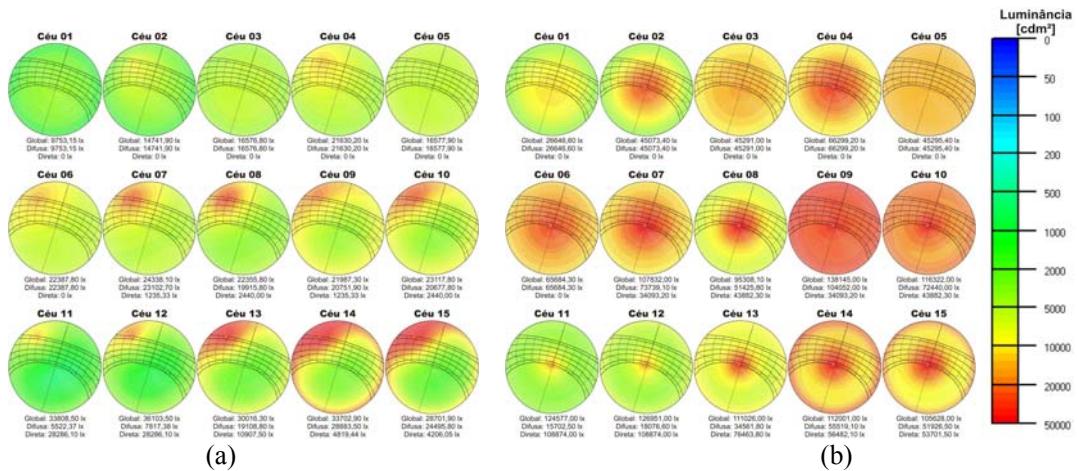


Figura 2 – Distribuição das luminâncias na abóboda celeste para os 15 tipos de céu, para o dia 21 de junho às 15 horas (a) e para o dia 21 de dezembro às 12 horas (b), para a cidade de Florianópolis/SC.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é comparar os resultados de cálculos luminosos realizados para os 15 tipos de céus adotados pela CIE, através de simulações computacionais realizadas do último pavimento do Prédio de escritórios Primavera Office (em projeto) em Florianópolis - SC.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido através da análise comparativa dos resultados de diferentes simulações computacionais da iluminação natural considerando diferentes tipos de céus e diferentes datas. As simulações foram efetuadas sobre o modelo de uma sala de escritórios localizada na cidade de Florianópolis.

3.1 Descrição do modelo

O modelo estudado constitui uma representação gráfica de uma parte do ultimo andar do Prédio de Escritórios Primavera, localizado na cidade de Florianópolis (latitude 27° 30' S e longitude 48° 30' W). O design do prédio foi desenvolvido pelo escritório MOS - Arquitetos Associados - e a consultoria na iluminação natural foi realizada pelo Laboratório de Conforto ambiental (LabCon) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O pavimento estudado tem uma área de 520 m² (Figura 3).

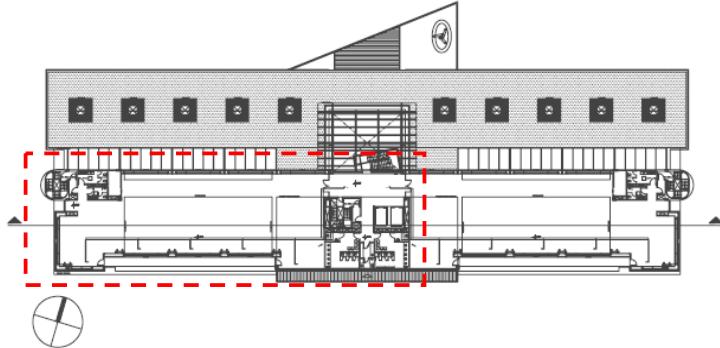


Figura 3 – Planta arquitetônica do modelo de estudo.

3.2 Tipos de céu adotados

Os tipos de céu adotados são modelos programados a partir das fórmulas e parâmetros da ISO 15469:2004 Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky, utilizando os quinze modelos de céu conforme a luminância do elemento do céu, mostrado na Figura 4:

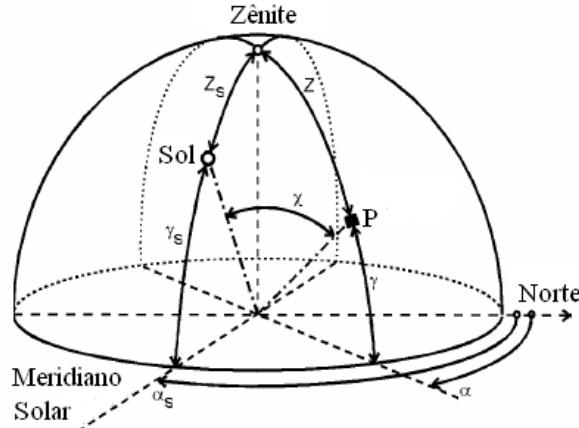


Figura 4 – Parâmetros utilizados para definir a posição do sol e dos elementos do céu (fontes: ISO 15469:2004 Spatial distribution of daylight -CIE standard general sky e Pereira, 2009, p. 15)

Onde:

- Z_s - ângulo entre o zênite e o Sol [graus];
- Z - ângulo entre o zênite e o elemento do céu [graus];
- γ_s - elevação solar a partir do horizonte [graus].
- γ - elevação do elemento do céu a partir do horizonte [graus].
- χ - ângulo compreendido entre o ponto P e o Sol [graus];
- α_s - Azimute do sol (sentido horário a partir do norte) [graus];
- α - Azimute do elemento do céu (sentido horário a partir do norte) [graus];

A determinação de cada tipo de céu parte de um conjunto de fórmulas único, nas quais um conjunto de 5 parâmetros discretos, representados por grupos de fatores aplicados às fórmulas, apresentam 15 combinações distintas, cada uma definindo um tipo de distribuição relativa de luminâncias para cada parcela de céu, comparada com uma dada luminância da parcela correspondente ao zênite. O modelo não fornece valores absolutos de luminância mas apenas valores relativos, sendo que a determinação da luminância do zênite pode ser obtida pela leitura de arquivos climáticos, por métodos analíticos ou por atribuição de valores empíricos.

Todas as informações referentes as formulas matemáticas utilizadas no software e os parâmetros para definir os tipos de céus foram tomadas da norma *ISO 15469:2004 Spatial distribution of daylight -CIE standard general Sky, 2004*.

3.3 Software utilizado

Os cálculos dos níveis luminosos foram efetuados através de simulações computacionais efetuadas no software Apolux; os desenhos tridimensionais foram feitos em Autocad e exportados posteriormente para o módulo fractal¹ do Apolux. Neste módulo foram definidos os critérios de fracionamento² das superfícies e as propriedades dos materiais (Tabela1).

¹ O modulo fractal no Apolux permite realizar um conjunto de operações de preparação para que um modelo tridimensional desenvolvido em Autocad possa ser processado pelo módulo Fotón.

² O fracionamento consiste em dividir as diferentes superfícies do modelo em parcelas de área, de forma a permitir a aplicação dos conceitos matemáticos utilizados no processamento do método da Radiosidade para a obtenção de uma solução de iluminação natural determinada.

Material	Refletância
Estrutura	40
paredes	70
Forros	80
Subforro lateral	40
Tijolo aparente	40
Portas	35
Brise ático	80
Parede ático	25
Planos escuros	20
Vidros claros	80
Vidros escuros	50
Piso Externo	10

Tabela 1 – Refletância dos materiais utilizados

No *Módulo foton*³, foi feito o cálculo do *fator de forma*⁴. Na resolução do cálculo do fator de forma o software utilizado permite a escolha da quantidade de faixas em que é dividida a abobada. Essas faixas são subdivididas em parcelas iguais que representam segmentos angulares esféricos aproximadamente iguais. (Carvalho, 2009). Para este trabalho foi escolhida a divisão do hemisfério em 26.335 ângulos sólidos (Resolução media).

Na definição do tipo de céu os valores de referência de turvamento e da razão da iluminância difusa e extraterrestre horizontal usados foram os que o software traz por *default*. Para definir estes valores o software baseia-se nos valores típicos de: a) Turvamento da atmosfera e b) Relação Dv/Ev entre Iluminância Difusa Horizontal Global - Dv e Iluminância Extraterrestre - Ev , conforme referenciado em Kittler, Perez e Darula (1997) e de Darula e Kittler (2002).

Nestes artigos os autores referenciam como típicos, para cada tipo de céu, estes dois parâmetros através de uma faixa de ocorrência mais freqüente. No algoritmo atual do programa a determinação do tipo de céu é feita pelo usuário, sendo que para cada tipo existe um intervalo típico de Turvamento para céu com presença de Sol (do tipo 7 em diante) e de Razão Dv/Ev para céus sem presença de Sol (os 6 primeiros) conforme referido nos artigos. Os valores *default* foram intuídos intermediariamente nos intervalos citados, podendo no programa serem controlados dentro das faixas sugeridas. Estes valores foram adotados em virtude da falta de referências objetivas para a formulação a partir de dados típicos da região (inexistentes).

3.4 Simulações

Sobre o modelo processado no software foram feitas simulações de iluminação natural para dois dias do ano, junho 21 e dezembro 21, e em três momentos diferentes de cada dia, às 9:00h, às 12:00h e às 15:00h, para um total de 6 instantes representativos. Em cada instante foram simulados os 15 tipos de céu definidos pela CIE. No total foram efetuadas 90 simulações.

3.5 Obtenção e tratamento de dados

Parte dos resultados das simulações foi salvo em arquivos de texto e posteriormente tratados em planilhas de Excel. Outra parte foi diretamente obtida a partir do tratamento gráfico que o *Apolux* realiza.

³ O Módulo FÓTON permite calcular, para um determinado projeto de espaço, a iluminação proveniente da incidência de luz natural, tanto devido à luz direta do Sol quanto da contribuição de luz difusa proveniente da abóbada celeste. Dada esta incidência inicial de luz, o módulo calcula, segundo uma formulação matemática teórica baseada no "método da radiosidade", a componente refletida gerada pelas inter-reflexões nas superfícies do projeto, fornecendo uma avaliação da iluminação final resultante.

⁴ Os fatores de forma permitem relacionar como um determinado ponto de uma superfície receptora recebe a luz de uma determinada porção de superfície emissora ou de uma determinada porção da abóbada celeste. No módulo *foton* o *fator de forma* corresponde à porcentagem do hemisfério que é definido (digamos que "visto") pelo plano que contém a superfície onde se encontra o ponto.

A análise dos resultados foi efetuada a partir dos níveis luminosos calculados na malha de pontos localizada à altura do plano de trabalho (75 cm).

Para efetuar as análises foram definidas duas estratégias gráficas:

3.5.1 Análise da suficiência luminosa no plano de trabalho

Para esta estratégia foram definidos cinco níveis de iluminância:

- A. 0 a 150 lux. Insuficiente
- B. 150 a 350 lux. Transição inferior
- C. 350 a 650 lux. Suficiente
- D. 650 a 2000 lux. Transição superior
- E. 2000 lux e mais. Excessiva

O nível C representa uma faixa com iluminância suficiente para efetuar as tarefas próprias de um escritório comum, entre 350-500 lux. Os níveis A e E, são as faixas que representam pouca e muita luz, respectivamente, para efetuar atividades próprias de um escritório.

Nesta estratégia é mostrada a comparação, nos 15 tipos de céu, da distribuição percentual dos 5 níveis luminosos no plano de trabalho, numa data e hora específica.

Além disto, nesta estratégia são mostradas as distribuições das iluminâncias, medidas em lux, no plano de trabalho, obtidas a partir do tratamento interno que o software realiza, em cada situação.

3.5.2 Análise no eixo longitudinal

Nesta estratégia é mostrada a variação da iluminância, medida em lux ao longo do eixo longitudinal (Ver figura 3) do modelo estudado, segundo o tipo de céu numa data e hora específica.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A seguir são apresentadas as comparações entre as iluminâncias encontradas para o último pavimento do Prédio de escritórios Primavera. As iluminâncias foram obtidas a partir da simulação dos 15 tipos de céu adotados pela CIE, realizadas pelo software Apolux. Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos para o dia 21 de junho às 15 horas, horário em que foram encontradas as menores iluminâncias internas; e para o dia 21 de dezembro às 12 horas, com as maiores iluminâncias.

4.1.1 Análise da suficiência luminosa no plano de trabalho

Esta análise procura mostrar as diferenças na qualidade da iluminação no plano de trabalho dependendo da escolha do tipo de céu para a simulação. Os Gráfico 1 e 2 mostram para cada tipo de céu a porcentagem da área de trabalho, do último pavimento do edifício Primavera, que cada faixa de iluminação atinge. Por ser um projeto com preocupação no uso da iluminação natural, de forma a atender a maior área possível, percebe-se que apenas para os tipos de céu 1 e 2, em junho, encontram iluminâncias na faixa de transição inferior.

O Gráfico 1 mostra que, para junho, há maior incidência de iluminâncias na faixa de transição superior para os tipos de céu que representam uma condição de céu parcialmente nublado, enquanto para o céu claro há uma variação entre modelos de céu que equilibram os resultados entre transição superior e iluminância excessiva, e modelos de céu onde o resultado é predominantemente de iluminâncias acima de 2000 lux. O Gráfico 2 apresenta os resultados encontrados para o dia 21 de dezembro às 12 horas, onde as iluminâncias são predominantemente excessivas, com exceção de dois tipos de céu encobertos e outros três tipos de céu onde é mais clara a interferência das medidas de proteção de solar do edifício.

A Figura mostra a distribuição luminosa para três tipos de céu, deixando mais evidente a diferença da ocorrência das iluminâncias mostradas nos Gráficos 1 e 2. Através desta figura 5 fica mais clara a distribuição das iluminâncias de acordo com as faixas de iluminação pré-estabelecidas.

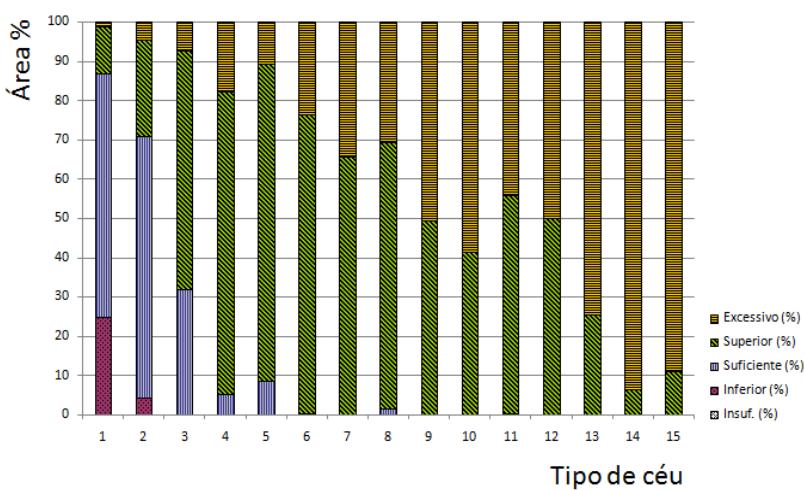


Gráfico 1 – Distribuição do percentual dos cinco níveis de suficiência luminosa na área do plano de trabalho. Comparação dos 15 tipos de céus em simulações feitas para Junho 21 – 15 horas.

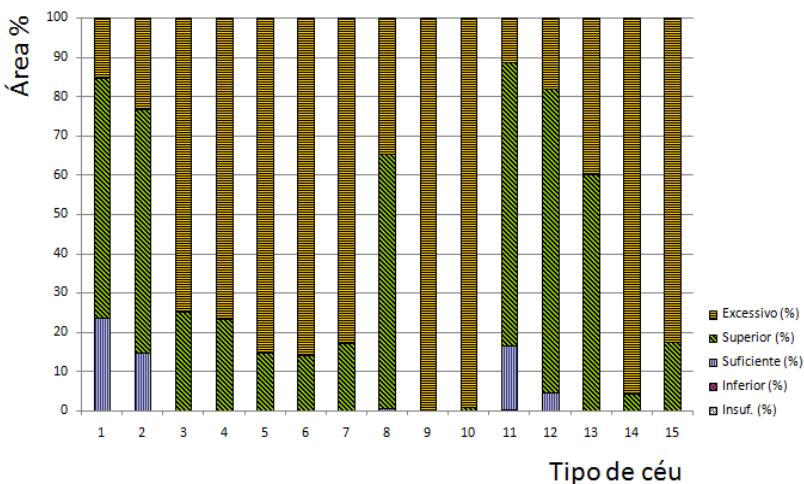


Gráfico 2 – Distribuição do percentual dos cinco níveis de suficiência luminosa na área do plano de trabalho. Comparação dos 15 tipos de céus em simulações feitas para Dezembro 21 – 12 horas.

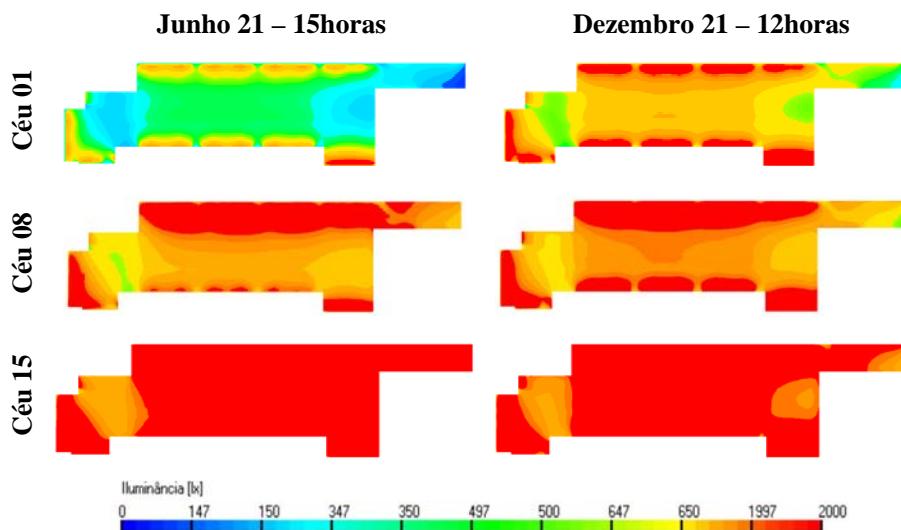


Figura 5 - Distribuição luminosa para os tipos de céu encoberto (01), parcialmente nublado (08) e claro (15).

4.1.2 Análise das iluminâncias no eixo longitudinal

A análise da suficiência luminosa dá uma boa noção da qualidade da iluminação atingida no plano de trabalho pelos diferentes tipos de céu. No entanto, por ser uma análise onde a iluminância está agrupada em faixas não se tem a percepção da real grandeza atingida. Os Gráfico 3 e 4 mostram as iluminâncias encontradas, no eixo longitudinal, para os 15 tipos de céu. Através destes gráficos percebe-se que para Junho, época com menores luminâncias da abóbada celeste, as condições de céu claro resultam em uma maior iluminância no plano de trabalho. Isso já não ocorre para dezembro, onde alguns tipos de céu parcialmente nublado resultam em iluminâncias com até o dobro das obtidas através do céu claro, isso ocorre principalmente pelas características do modelo de céu e das luminâncias da abóbada celeste.

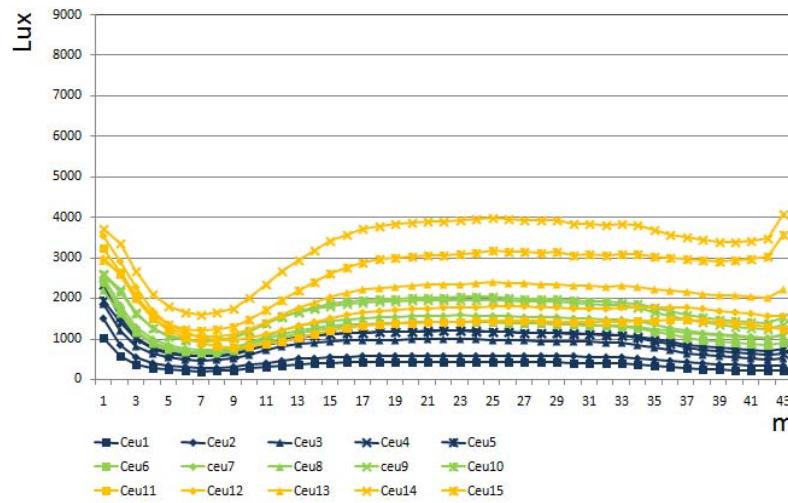


Gráfico 3 – Variação no nível luminoso (lux) no eixo longitudinal segundo o tipo de céu para Junho 21 – 15 horas.

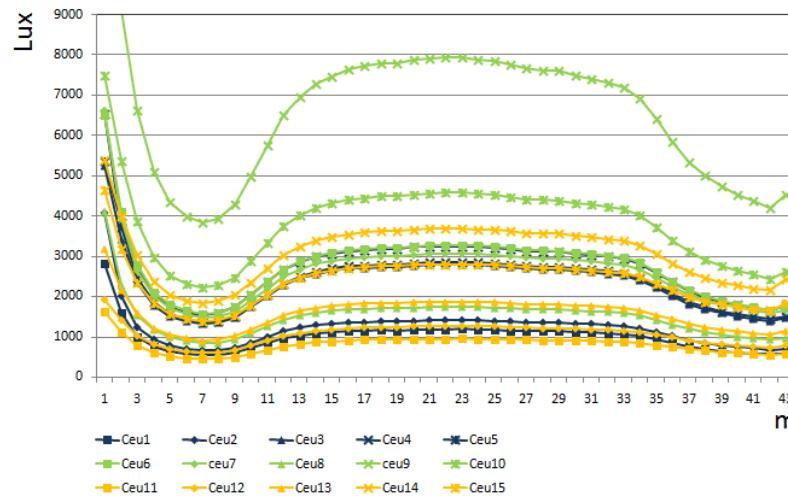


Gráfico 4 – Variação no nível luminoso (lux) no eixo longitudinal segundo o tipo de céu para Dezembro 21 – 12 horas.

5 CONCLUSÕES

Como visto neste trabalho existem grandes diferenças entre os modelos de céu de mesmo tipo (encoberto, parcialmente nublado e claro), assim, conhecer as características dos modelos de céu é importante para se fazer uma escolha adequada ao clima. O estudo mostra a utilidade de um grande avanço na formulação de padrões analíticos para a descrição da abóbada, expressos na *ISO 15469:2004, Spatial distribution of daylight -CIE standard general Sky*, que significam maior possibilidade de precisão na obtenção de estudos de iluminação. Por outro lado, permitirá analisar o comportamento do algoritmo incorporado ao programa Apolux frente a outras eventuais demonstrações de aplicação dos modelos analíticos, já que para este trabalho não encontramos, ainda, na literatura, referências demonstrativas de resultados de distribuição das luminâncias para comparação. Este trabalho também serve como referência inicial para avaliação do algoritmo frente ao Relatório CIE 171 (CIE Standard ,2006), que contém protocolos de validação de algoritmos de cálculo de iluminação, inclusive através da utilização dos modelos aqui estudados, numa pesquisa de dissertação de mestrado em andamento atualmente na UFSC, assim como de outras pesquisas de mestrado correlatas.

6 REFERÊNCIAS

- CARVALHO, Carolina Rocha. **Avaliação do programa APOLUX segundo protocolos do relatório CIE 171: 2006 referentes à iluminação natural.** Florianópolis, 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – PósArq, UFSC, 2009.
- CIE STANDARD – COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE (2006). Technical Report. CIE 171:2006 “**Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs**”. France, 2006.
- CIE STANDARD – Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky. **in: ISO 15469.** 2004.
- CLARO, Anderson. **Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade aplicado à Iluminação Natural.** Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, UFSC, 1998.
- DARULA, S., KITLER, R., 2002. CIE general sky standard defining luminance distributions. **In: Proc. ESim, IBPSA Canada**, pp. 11–13.
- KITLER, Richard; PEREZ, Richard; DARULA, Stanislav. A new generation of sky standars. **In: Proc. Conf. Lux, Europa**, p.359-373, 1997.
- NABIL, Azza; MARDALJEVIC, John. Useful daylight illuminances: a new paradigm for assessing daylight in building. **Lighting Research and Technology**, v. 37, nº 1, p 41-59, 2005.
- PEREIRA, Roberto C. **Avaliação de ferramentas de simulação de iluminação natural através de mapeamento digital de luminâncias por meio de mapeamento digital de luminâncias da abóbada celeste e entorno.** Florianópolis, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 2009. 184p.