

MÉTODO TRIPLO PARA ESTIMATIVA ANUAL DE LUZ NATURAL (EALN) USANDO RADIOSIDADE

TRIPLE METHOD FOR DAYLIGHT ANNUAL ESTIMATE (DAE) USING RADIOSITY

 Anderson Claro ¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina,
Florianópolis, SC, Brasil.
anderson.claro@ufsc.br

Resumo

Além do conforto visual humano e estética, a luz natural tem importante papel no consumo de energia elétrica, por permitir substituir o uso de luz artificial ao longo dos dias. Hoje existe a Simulação Dinâmica usando Arquivos Climáticos digitais, que descrevem característica típica anual da disponibilidade de radiação e luz, em muitas localidades do planeta. Esta simulação usa o conceito de Daylight Coefficient (DLC), que associa à determinadas porções do céu a quantidade de luz que chega a pontos dos planos de ambientes, permitindo estimar disponibilidade diária/horária de luz natural durante um ano típico. Propõe-se aqui o Coeficiente de Radiosidade (CR), relacionando Iluminância inicial, de uma porção de plano, num ambiente com Iluminância parcial que, após várias inter-reflexões, chegam a outras porções de planos do ambiente, partindo daquela porção inicial. Apresenta-se o conceito de Estimativa Anual de Luz Natural – EALN, que propõe uma abordagem tríplice baseada na Radiosidade e usando o Coeficiente de Radiosidade, o Daylight Coefficient numa versão desenvolvida para Radiosidade e também o novo Conceito de Radiosidade Plena (RP), este usando ciclos integrais de Radiosidade no método clássico, de acordo com uma análise do ambiente que determina qual dos três métodos é mais rápido para a circunstância do projeto. Os três métodos conduzem aos mesmos valores de EALN, como é demonstrado, otimizando o tempo de estudos, além de outras vantagens. Modelos simulados pelos três métodos em diferentes graus de resolução mostram a consistência e confiabilidade da abordagem, como se demonstra nos resultados obtidos.

Palavras-chave: simulação dinâmica de luz natural. eficiência energética. aproveitamento de luz natural. estimativa anual de luz natural. iluminação natural em arquitetura.

Contribuição do autor:

AC: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, administração de projetos, programas, supervisão, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição.

Fomento: Não houve fomento

Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editor Responsável:

Leticia de Oliveira Neves 

Abstract

In addition to human visual and aesthetic comfort, daylight plays an important role in electricity consumption, as it allows replacing the use of artificial light throughout the day. Currently, there is Dynamic Simulation using Digital Climate Files, which describes the typical annual characteristic of solar radiation availability in many places on the planet. This simulation uses the concept of Daylight Coefficient (DLC), which associates to certain portions of the sky the amount of light that reaches certain points in the environmental surface plans, allowing the estimation of daily/hourly availability of daylight during a typical year. The Radiosity Coefficient (CR) is proposed here, relating the initial illuminance of a certain portion of a surface plane in an inner environment with a Partial Illuminance that, after several inter-reflections, reaches other surface plane portions of the environment from that initial portion. The concept of Daylight Annual Estimate – DAE is presented through a proposal of a triple approach based on Radiosity and using the Radiosity Coefficient, the Daylight Coefficient in a version developed for Radiosity and the new Concept of Full Radiosity (RP). The latter uses integral cycles in the classical method, according to an analysis of the environment that determines which of the three methods is faster for the design's circumstance. The three methods lead to the same EALN values, optimizing the study's time and other advantages. Models simulated by the three methods at different degrees of resolution confirm the consistency and reliability of the approach, as shown in the results.

Keywords: daylight dynamic simulation. energetic efficiency. daylight utilization. annual estimate of daylight. daylight in architecture.

How to cite this article:

CLARO, A. Método triplo para estimativa anual de luz natural (EALN) usando radiosidade. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. e022009, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v13i00.8665545>

Submitted 04.05.2021 – Approved 18.10.2021 – Published 23.02.2022

e022009-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. e022009, 2022, ISSN 1980-6809



Introdução

O estudo da iluminação natural em arquitetura e urbanismo cumpre, por um lado, a função de garantir condições de conforto ambiental e funcionalidade e, por outro, a de permitir a economia de energia usada na adequação dos ambientes às condições de conforto e funcionalidade. O estudo voltado para o aproveitamento da luz natural, como fonte de energia, promovendo construções mais eficientes, esbarra na necessidade de caracterizar o comportamento dos ambientes ao longo do tempo, com todas as possíveis variações que podem ocorrer. Geralmente este estudo é feito com base anual, procurando determinar a cada hora, dia e mês como seria, provavelmente, o céu que disponibiliza luz natural.

O método mais difundido de realização destas análises utiliza modelos computacionais conhecidos como *Climate-Based Daylight Modelling*. Este método pode ser utilizado combinado com abordagens de cálculo, que permitem diferentes graus de resolução, possibilitando determinar o quanto um modelo de análise descreve o ambiente e a representação do céu, em uma dada localidade. Quanto maior a resolução utilizada para os modelos e métodos nos estudos, maior a precisão e maior o tempo de processamento. A maioria das ferramentas computacionais atuais, como Radiance, DAYSIM e DIVA, fundam-se na definição clássica dos *Daylight Coefficient* (DLC) (TREGENZA; WATERS, 1983). O uso dos DLCs permite caracterizar um padrão de comportamento luminoso do ambiente, utilizando dados climáticos anuais (geralmente registrados em arquivos digitais) que descrevem diferentes caracterizações de disponibilidade de luz do céu e do sol, em diferentes localidades. Entretanto, a utilização deste método de abordagem em cálculos, torna-se sucessivamente mais custosa computacionalmente à medida que se estudam ambientes maiores, de maior complexidade geométrica e lumínica.

As abordagens computacionais mais conhecidas e utilizadas, fundamentadas no DLC, utilizam o método *Ray Tracing* Recursivo para seu cálculo. São particularmente conhecidas aquelas que associam ao *Ray Tracing* Recursivo à abordagem estatística de Monte Carlo (TREGENZA e WATERS, 1983; TREGENZA, 1983).

Os algoritmos que constituem a plataforma de comandos e funções RADIANCE (WARD, 1994), baseados nos modelos *Ray Tracing* Recursivo, constituem o cerne da maioria dos programas que realizam simulações dinâmicas. Destacam-se o DAYSIM, muito conhecido e utilizado, e o DIVA. O DIVA é um plug-in similar ao DAYSIM, instalável no programa de modelagem RHINOCEROS.

Por outro lado, não há registros de utilização do método da Radiosidade, como alternativa ao *Ray Tracing* Recursivo, no estudo da iluminação de Cohen e Greenberg (1985), que abordem o conceito de disponibilidade anual de luz natural usando Simulação Dinâmica. Particularmente pela dificuldade de superarem as demandas de processamento massivo geralmente associados à Radiosidade.

Analisando o Modelo Vetorial Esférico (MVE) (CLARO, 1998) como método de aplicação da Radiosidade, de forma completa, e considerando as atuais condições de disponibilidade de equipamentos de desempenho mais avançado, vislumbrou-se a possibilidade de utilizar modelos alternativos ao DLC para realizar análises em séries temporais de ambientes complexos. Consideramos o MVE ser eficiente, em dispêndio de tempo e até mesmo de precisão, e que apresentam algumas vantagens adicionais em relação ao que denominaremos DLC Clássico.

Hipótese e objetivo

A hipótese de trabalho adotada é que, considerando-se a necessidade de estudos de ambientes complexos em geometria e caracterização de materiais, o MVE para Radiosidade permite abordar o método do DLC. Assim serão definidas como **Coefficientes de Radiosidade e Radiosidade Plena** as interpelações alternativas, fundadas num comportamento padrão de trocas luminosas, entre as superfícies do ambiente.

O Objetivo deste trabalho é propor três métodos alternativos baseados na Radiosidade, para determinação da disponibilidade anual de luz natural, denominado **Estimativa Anual de Luz Natural (EALN)**, para ambientes complexos, utilizando arquivos climáticos. O primeiro método é baseado no conceito de **DCL**. O segundo método é calculado utilizando-se **Coefficientes de Radiosidade**. O terceiro é calculado utilizando-se plenamente a Equação da Radiosidade, que será denominado **Radiosidade Plena**. Os três métodos utilizam os Padrões de Céu da Norma ISO 15469:2004(E)/ CIE S 011-/E:2003, caracterizados, utilizando-se dados de arquivos climáticos (CIE, 2004).

Este trabalho apresentará as abordagens do **Coefficiente de Radiosidade** e da **Radiosidade Plena** como alternativas ao método do **DLC** clássico, que será tratado também pelo método da Radiosidade.

Fundamentação

Tanto o *Ray Tracing* Recursivo como a Radiosidade possuem vantagens e desvantagens, conforme bem descreve Geebelen (2003). Os principais aspectos levantados com relação ao *Ray Tracing* Recursivo são a dependência do ponto de vista do observador e a complexidade na construção da chamada “árvore de raios”. O método não garante que todo ou a maior parte do ambiente seja descrito adequadamente, a não ser a custo de imensa quantidade de raios (com mais dispêndio de tempo).

Em princípio, a Radiosidade apresenta o mesmo problema: o fato de lidar com elementos finitos introduz a possibilidade da descrição dos fluxos omitir segmentos menos significativos para um ponto, enquanto que pode superestimar outros. Na prática isto corresponde a uma introdução de erro com consequências parecidas, com as limitações do método *Ray Tracing* Recursivo, e que também exige maior granularidade da fragmentação para reduzir os erros.

Ambos os métodos comportam os conceitos de refinamento progressivo, tais como: a) aumento da resolução de investigação no ambiente (amostra de raios ou fatores de forma) quando identificadas circunstâncias particulares (como o alto contraste); b) métodos estatísticos estocásticos, como o Monte Carlo.

No *Ray Tracing* Recursivo somente os raios que interessam à imagem são investigados. Na Radiosidade uma descrição do ambiente é feita pelo método de elementos finitos.

Da perspectiva do estudo da iluminação por simulação dinâmica, com uso de arquivos climáticos digitais, o marco de referência principal foi o trabalho publicado por Perez et al. (1993), onde foi proposto um modelo matemático para obtenção dos dados de iluminação utilizando-se dados de radiação solar medidos. Aliado ao conceito de DLC, proposto por Tregenza (1983), que guiará os atuais estudos da disponibilidade anual de luz natural, particularmente.

O conceito de Daylight Coefficient

O conceito de DCL proposto por Tregenza e Waters (1983) permite maior facilidade na avaliação de disponibilidade de luz natural em um ambiente, ao longo do tempo,

visando, principalmente, estimar o potencial de economia de energia gasta com luz artificial, na utilização de luz natural disponível.

O conceito é relativamente simples e fundamenta-se num método de determinação de iluminâncias em pontos no interior de um ambiente, que utiliza o método *Ray Tracing* Recursivo (WHITTED, 1980) combinado com técnicas estatísticas do Método Monte Carlo, conforme proposto também por Tregenza (1983).

No cálculo do DLC, o pressuposto é que o fluxo luminoso que chega a um ponto, oriundo de uma determinada parcela do céu, depende da intensidade do fluxo que deixa a parcela de céu na direção do raio e do conjunto de reflexões, transmissões e absorções pelas quais o raio passa, até atingir o ponto, obtido com a aplicação do método *Ray Tracing* Recursivo. Tomando-se o ambiente como constante (geometria e materiais) o DLC é um coeficiente, também constante, que relaciona o fluxo que sai da parcela da abóbada com o fluxo que chega ao ponto do ambiente, de forma direta ou conduzida.

Assim, considera-se uma setorização do céu em regiões luminosas e estabelece-se, para cada uma das regiões luminosas, o DLC relativo a cada um dos pontos do ambiente.

A grande vantagem do DLC, à época de sua proposição, era vencer o custo computacional de se proceder a uma extensa sucessão de simulações estáticas, para determinar, por exemplo, a disponibilidade de luz de um ambiente ao longo de um ano, estudando-se hora a hora. Supondo-se um ano de 365 dias, com 24 horas, teremos um total de 8.760 horas, das quais cerca de 4.380 (a metade) são diurnas. Assim, o uso dos DLCs implica, adotando-se o parcelamento de Tregenza (1983), em 145 cálculos estáticos, enquanto que, utilizando-se diretamente o conjunto de horas anuais, teremos no mínimo 4.380 simulações estáticas. O DLC permite cálculos rápidos mudando-se as condições do céu e do local.

O conceito do Modelo Vetorial Esférico

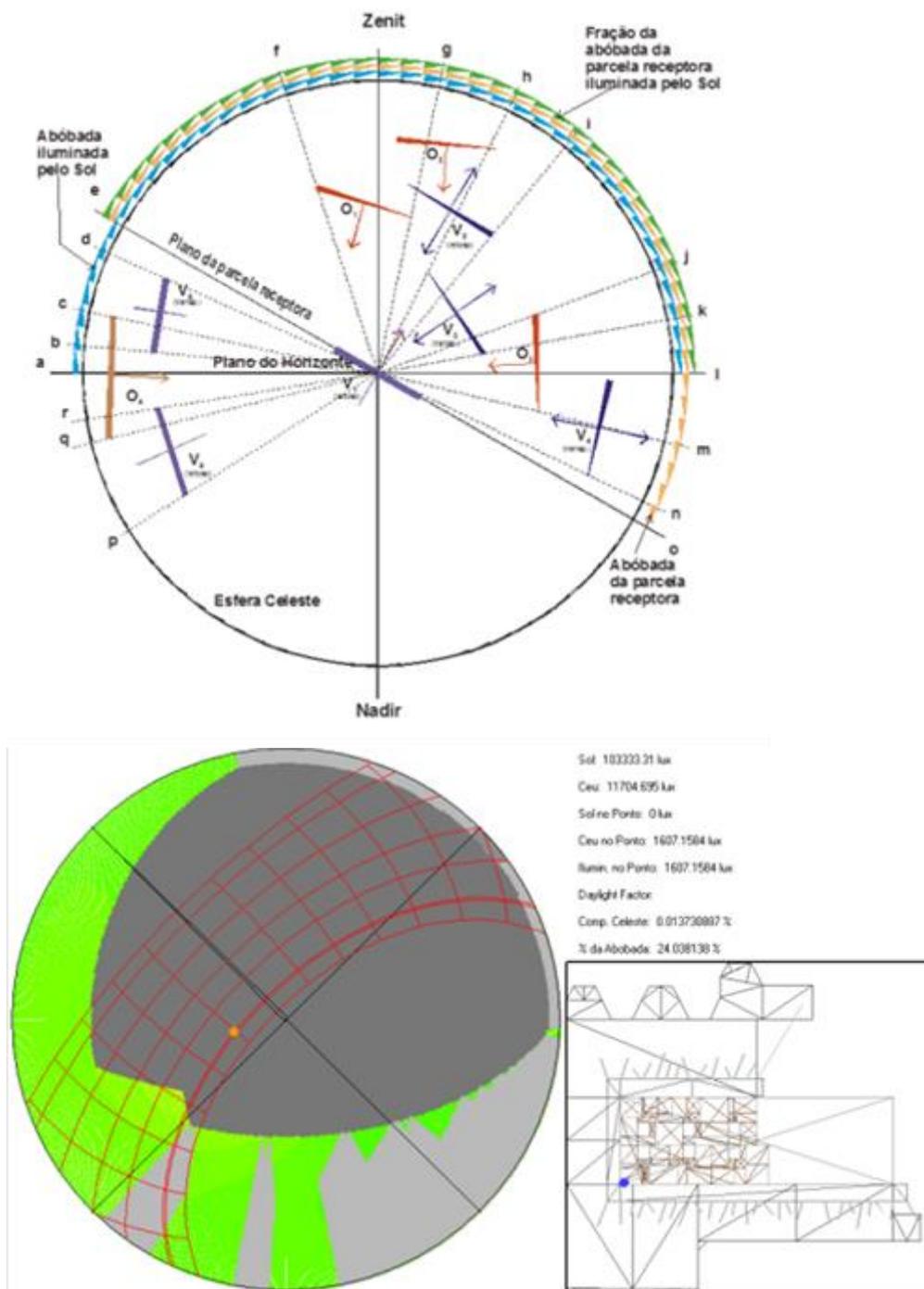
O MVE (CLARO, 1998) é uma nova abordagem do algoritmo de Radiosidade alternativa ao Hemi-Cubo proposto por Cohen e Greenberg (1985) e depois aprimorado por Cohen *et al.* (1988) com o Refinamento Progressivo.

Há dois aspectos que diferenciam o MVE do método associando o Hemi-Cubo ao Refinamento Progressivo, que denominaremos, daqui em diante, de Radiosidade Clássica:

1) A adoção de um referencial Geográfico/Astronômico unificado, denominado Globo de Vetores, alternativamente ao Hemi-Cubo. Este é um referencial geométrico e específico de cada ponto, em cada superfície, nas projeções para obtenção dos Fatores de Forma. O Globo de Vetores possui um conjunto de ângulos sólidos associados as direções geográficas, também fornece Fatores de Forma e uma descrição da Visibilidade de cada ponto das superfícies, considerando um referencial orientado pelos pontos cardeais.

2) O MVE estabelece uma dissociação entre a determinação dos Fatores de Forma (Figura 1-acima), que embasam a Visibilidade e a aplicação da Equação da Radiosidade, propriamente dita, que, no método clássico, são associadas e, assim, fundamentam o Refinamento Progressivo. Esta dissociação permite sucessivos cálculos de Radiosidade utilizando-se o mesmo cálculo de Visibilidade, além da obtenção de Máscaras de Sombreamento, muito úteis no estudo da iluminação e sombreamento (Figura 1 abaixo). A Máscara é na verdade um caso específico de projeção da Visibilidade, resultante do cálculo dos Fatores de Forma.

Figura 1 – Corte esquemático da representação da visibilidade para o modelo de cálculo do fator de forma em transmissores (acima) e Máscara de Sombreamento pelo MVE (abaixo)



Fonte: Claro (1998) (acima); o autor utilizando APOLUX IV (abaixo).

São computados, separadamente, os Fatores de Forma de cada vértice receptor em relação às superfícies emissoras, usando a somatória dos fatores de forma específica de cada direção contida na projeção, conforme a Equação 1:

$$F_{tfr,e} = \sum_{i=dri}^{drf} S_{r_i} * \cos(\overline{Nr} \wedge \overline{Dr}_i) * trs_i \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- $F_{r,e}$: é o fator de forma do vértice receptor r em relação à parcela emissora e ;
- S_{r_i} : é o ângulo esférico contido na direção i do globo (em steradiano)
- $(\overline{Nr} \wedge \overline{Dr_i})$: é o ângulo entre o vetor Normal Nr e o vetor da direção Dr_i do globo;
- dri e drf : são a direção inicial e a direção final da lista de direções contidas na projeção;
- tr_{s_i} : é a transmitância projetada na direção i .

No caso das direções não obstruídas, quando estão acima do horizonte, são computadas separadamente, registrando separadamente o fator de forma de cada direção visualizada do céu, calculados em cada direção pela mesma Equação (1) usada para o computo dos Fatores de Forma, mantidos os valores do Céu separadamente para cada direção do céu.

Quando as direções não obstruídas estão abaixo do horizonte, são computadas todas em um único Fator de Forma, correspondente ao Efeito Solo, pela mesma Equação (1).

Desta forma, são gerados dois arquivos: um de Visibilidade, contendo, para cada vértice, a relação dos Fatores de Forma e transmitância relativos a cada um dos outros vértices do ambiente; um arquivo de Céu, contendo a lista das direções da abóbada que cada vértice vê, com a respectiva transmitância, além dos Fatores de Forma de Planos Uniformes iniciais, considerados de luminância uniforme recebida do Céu e como fontes iniciais (não participam da Radiosidade), além do Efeito Solo.

Método para determinação da Estimativa Anual de Luz Natural (EALN)

Neste trabalho é proposto um modelo para a determinação de coeficientes que permitam, com uso dos arquivos de Visibilidade conceituados no MVE, obter o que se denominou de **Estimativa Anual de Luz Natural – EALN**, utilizando os modelos de céu caracterizados com os dados dos arquivos climáticos, em simulação encadeada, utilizando cálculo matricial. Aqui demonstraremos três abordagens alternativas no cálculo:

- Utilizando DLC:** correspondendo à abordagem clássica do conceito, conforme descrito na revisão bibliográfica, resolvido no contexto do MVE, com utilização da Radiosidade.
- Utilizando Coeficientes de Radiosidade (CR):** correspondendo a uma abordagem diferente e inovadora do DLC clássico, que não parte da discretização da abóbada celeste e, sim, da caracterização da relação entre a quantidade de luz que parte de um ponto em uma superfície, e a que chega a um ponto no plano de análise, depois de uma certa quantidade de inter-reflexões. Esta relação, no contexto desta conceituação, será denominada de Coeficiente de Radiosidade – CR e será descrita adiante.
- Utilizando a Radiosidade Plena (RP):** correspondendo a uma abordagem em que não são considerados coeficientes intermediários, aplicando-se diretamente os arquivos de visibilidade numa sucessão de soluções estáticas encadeadas, aplicando plenamente a equação da Radiosidade a cada unidade de tempo estudada.

Será demonstrado que, sob certas circunstâncias envolvendo simulações com resoluções variadas de baixa a alta visibilidade, relacionadas com resoluções geométricas variadas de baixa à alta complexidade, cada uma das três abordagens pode ser mais eficiente que as outras duas, na avaliação da **EALN**.

Para as conceituações foram realizadas verificações dos resultados práticos de simulação. No modelo geral, a seleção de método é feita pelos seguintes parâmetros:

- a) Se o número de direções da abóbada visualizadas pelos vértices principais do ambiente for menor que o número destes vértices, que visualizam a abóbada (considerando-se os planos opacos difusos e transmissores difusos apenas), e for menor também que o número de unidades de tempo (datas/horas) a serem avaliadas no ano, o método do DLC deve ser o mais conveniente e a sucessão de ciclos de Radiosidade será aplicado a cada direção visualizada para determinação do conjunto de DLCs. O algoritmo do método DLC está representado na Figura 2 (à esquerda).
- b) Se por outro lado o número de vértices principais (sem os vértices de análise), considerando-se apenas os que visualizam a abóbada, for menor que as outras duas variáveis - direções da abóbada visualizadas ou número de datas/horas - o método do CR deverá ser o mais eficiente e será aplicada uma sucessão de ciclos de Radiosidade para cada vértice que visualiza pelo menos uma direção da abóbada. O algoritmo do método CR está representado na Figura 2 (à direita).
- c) Finalmente, se o número de unidades de tempo (datas/horas) a serem avaliados for menor que as outras duas variáveis, o método da Radiosidade Plena, em tese, deve ser o mais adequado. Os sucessivos ciclos de Radiosidade são então aplicados para cada hora/data válida do intervalo diretamente computando a EALN. Este método não tem um algoritmo específico, constituindo numa aplicação sucessiva do método do MVE para o cálculo da Radiosidade. Na determinação da Visibilidade, o programa determina quais as direções visualizadas por algum vértice e quais os vértices que visualizam alguma direção.

A determinação da EALN propriamente dita, associada a cada um dos métodos de coeficientes – DLC e CR ou da Radiosidade Plena, é processada usando a opção por um dos três métodos, conforme parâmetros que o algoritmo regente dos métodos analisa.

Conceitualmente os três métodos conduzem ao mesmo resultado, descontadas eventuais diferenças insignificantes decorrentes de precisão em cada procedimento de cálculo.

Procedimento de verificação dos resultados

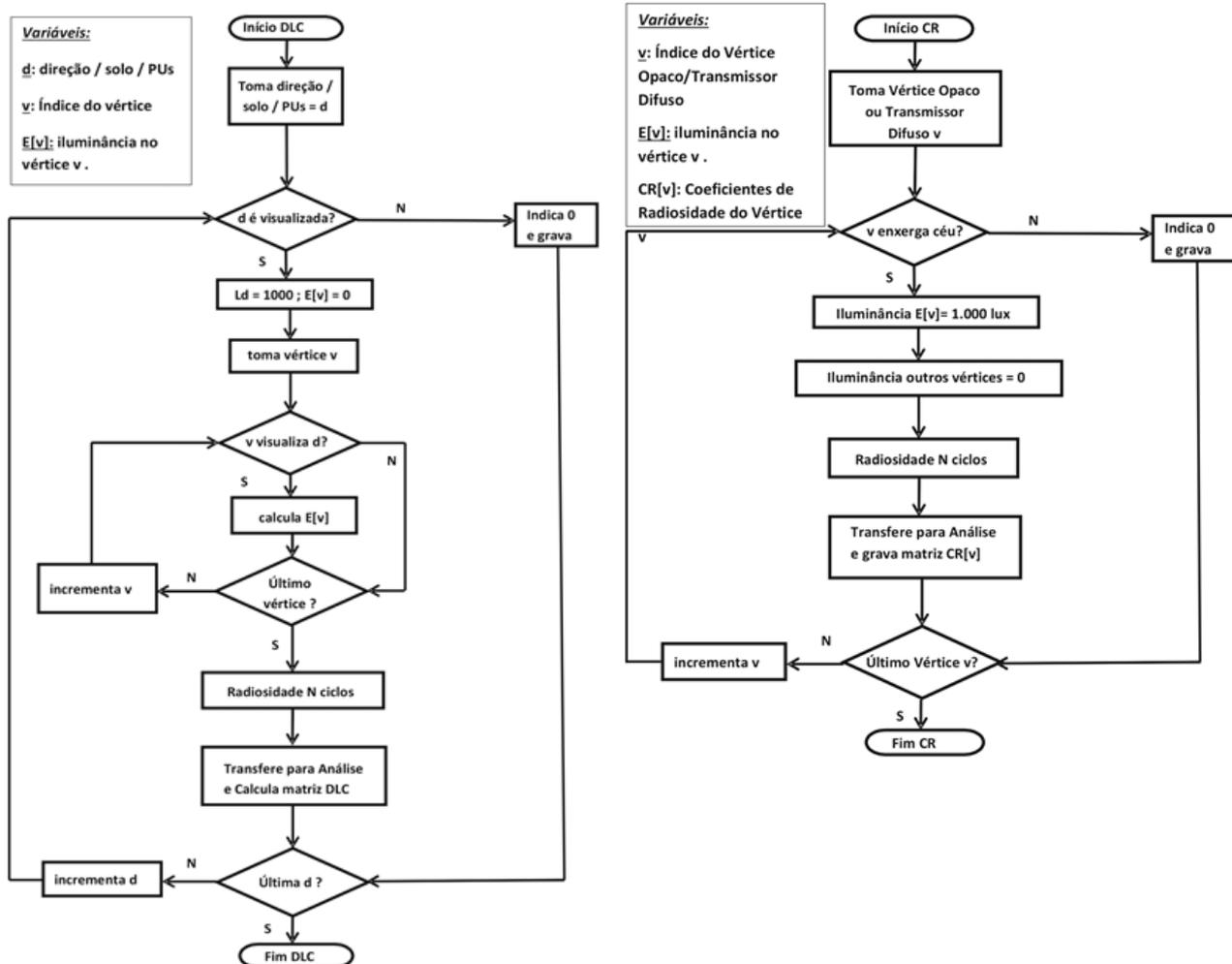
A verificação dos resultados foi realizada usando-se o Programa APOLUX IV, sendo que os algoritmos foram concebidos e desenvolvidos utilizando-se as funções e resoluções já implementadas no programa, elaboradas de acordo com os algoritmos propostos no Modelo Vetorial Esférico (CLARO, 1998). Descreve-se a seguir os modelos de ambientes assim como o método de processamento utilizados na verificação dos resultados.

Modelos de Verificação

A verificação foi feita utilizando-se 4 modelos de complexidade crescente: a) uma sala retangular com janela frontal desobstruída (Modelo TSTo_0-1, na Figura 3); b) o mesmo ambiente com protetores na janela (Modelo TST1_0-1, na Figura 4); c) um ambiente maior, em L, com protetores e iluminação zenital (Modelo TST2_0-1, na Figura 5); d) um ambiente complexo com várias salas e elementos de proteção externa complexos, correspondente à metade de um dos três pavimentos do edifício do Tribunal de Contas do Paraná (Figura 6), conforme o modelo criado por Moro, Krugler e Claro (2014) (Modelo TC_1-0, na Figura 7). A nomenclatura **_0-1** acrescida aos 3 primeiros modelos (TSTo, 1 e 2) indica que foram analisados vértices representativos a cada 0,1 m², em cada plano do modelo, enquanto que no modelo TC, com dimensões absolutas muito maiores

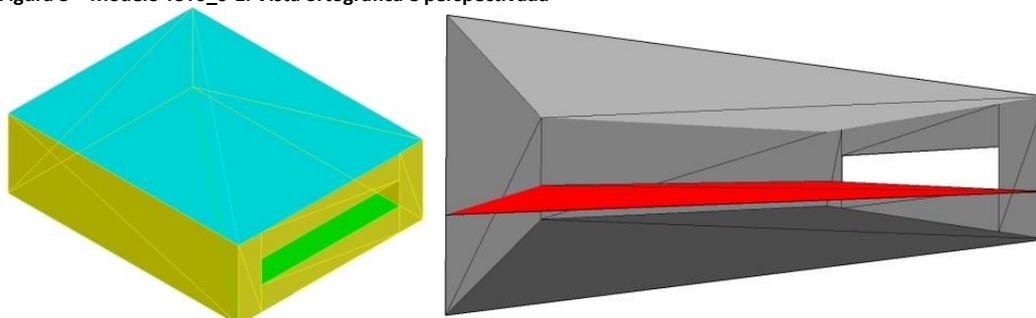
que os 3 primeiros, a nomenclatura **_1-0** indica que foram tomados vértices representativos a cada 1 m² nos seus planos. Nas Figuras 3, 4, 5, 6 e 7 são apresentadas imagens de perspectiva dos modelos em CAD e em perspectivas geradas no programa APOLUX IV utilizado na verificação.

Figura 2 – Algoritmo do método usando Daylight Coefficients (DLC) (à esquerda) e algoritmo do método usando Coeficientes de Radiosidade (CRD) (à direita)



Fonte: o autor.

Figura 3 – Modelo TSTO_0-1. Vista ortográfica e perspectivada

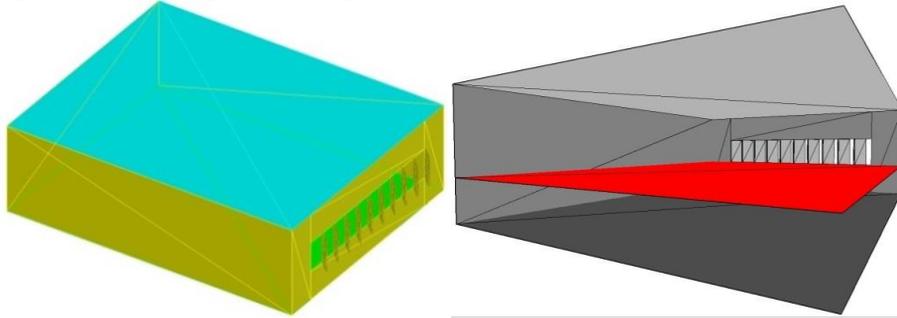


Fonte: o autor.

CLARO, A.

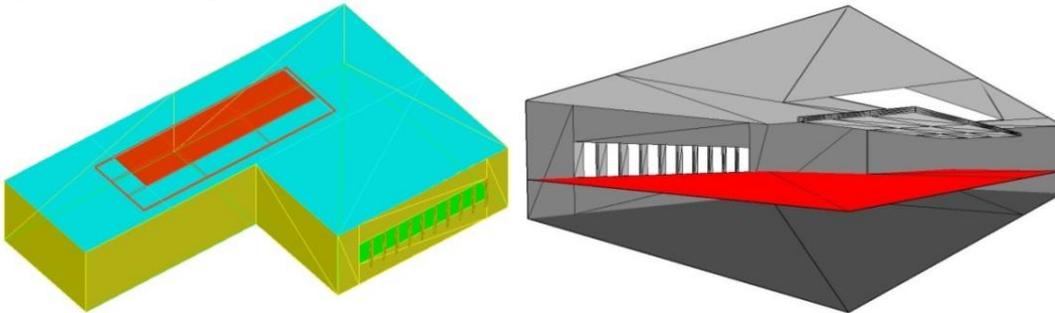
Método tripla para estimativa anual de luz natural (EALN) usando radiosidade

Figura 4 – Modelo TST1_0-1. Vista ortográfica e perspectivada



Fonte: o autor.

Figura 5 – Modelo TST2_0-1. Vista ortográfica e perspectivada



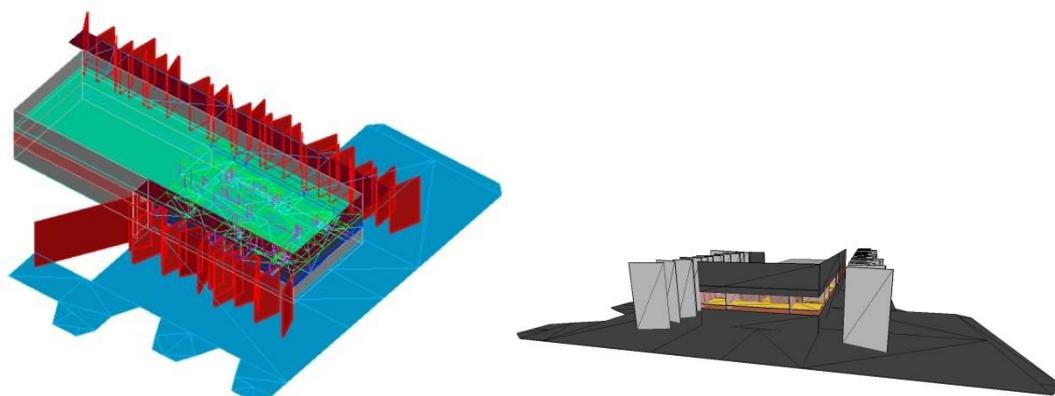
Fonte: o autor.

Figura 6 – Imagem do Edifício Sede do Tribunal de Contas do Paraná



Fonte: Moro *et al.* (2014).

Figura 7 – Modelo TC_1-0. Vista ortográfica e perspectivada



Fonte: o autor. (usando modelagem feita por Jeanne Moro, sob orientação do autor).

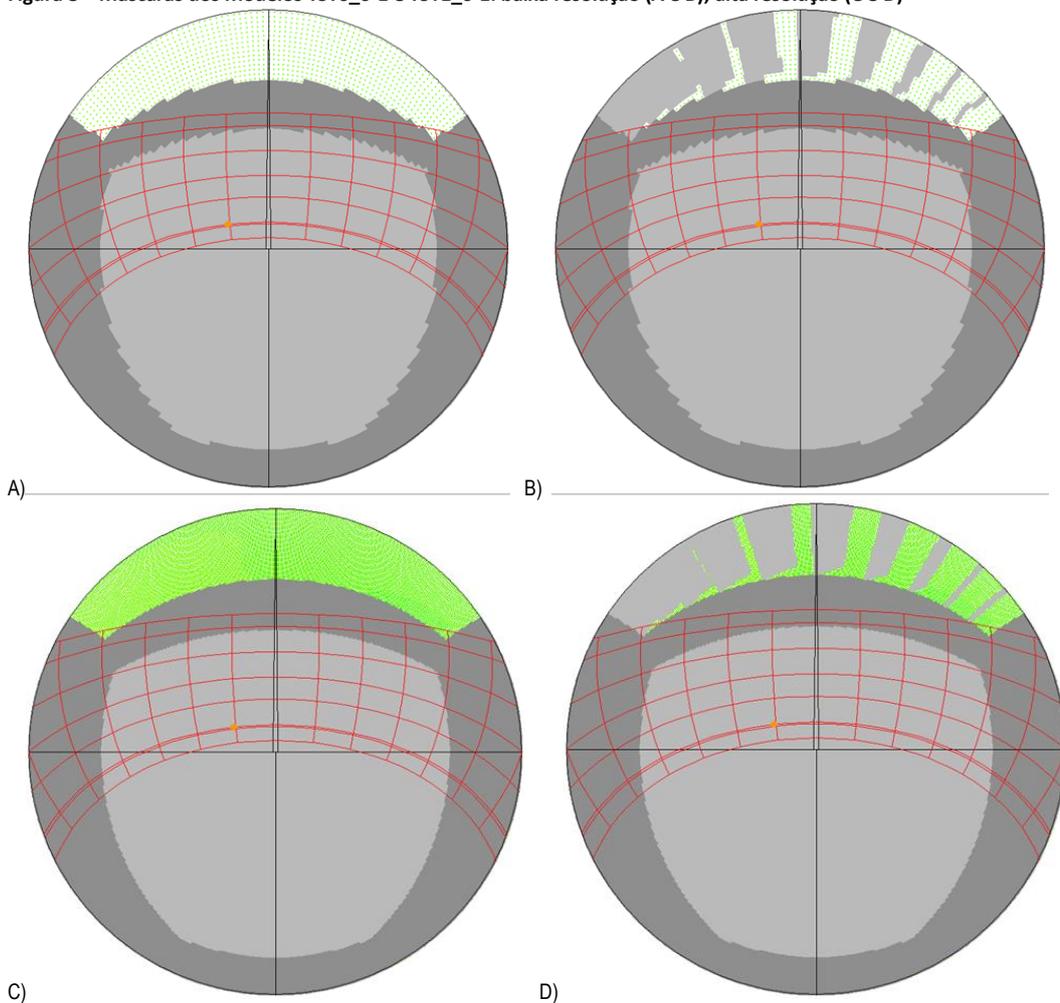
Graus de resolução do cálculo da visibilidade

O cálculo da Visibilidade foi feito com a discretização do Globo em pequenos ângulos sólidos representando direções, de acordo com os critérios descritos e validados para o MVE (CLARO, 1998). Observa-se que as quantidades de direções especificadas de cada discretização resultam de critérios de construção do Globo, adotados na construção do MVE. Foram acatadas três resoluções consideradas representativas da variabilidade da precisão da Visibilidade, conforme disponibilizado pelo programa APOLUX IV, usado na verificação:

- a) resolução de 16.302 direções no Globo (baixa);
- b) resolução de 52.670 direções no Globo (média);
- c) resolução de 146.198 direções no Globo (alta);

Nas imagens da Figura 8 estão representadas, a título de exemplo, Máscaras tiradas dos modelos TST0_0-1 e TST1_0-1 representadas com a visibilidade de baixa resolução (A e B) e de alta resolução (C e D) permitindo avaliar o grau de precisão com que cada ambiente é descrito no cálculo da visibilidade,

Figura 8 – Máscaras dos Modelos TST0_0-1 e TST1_0-1: baixa resolução (A e B); alta resolução (C e D)



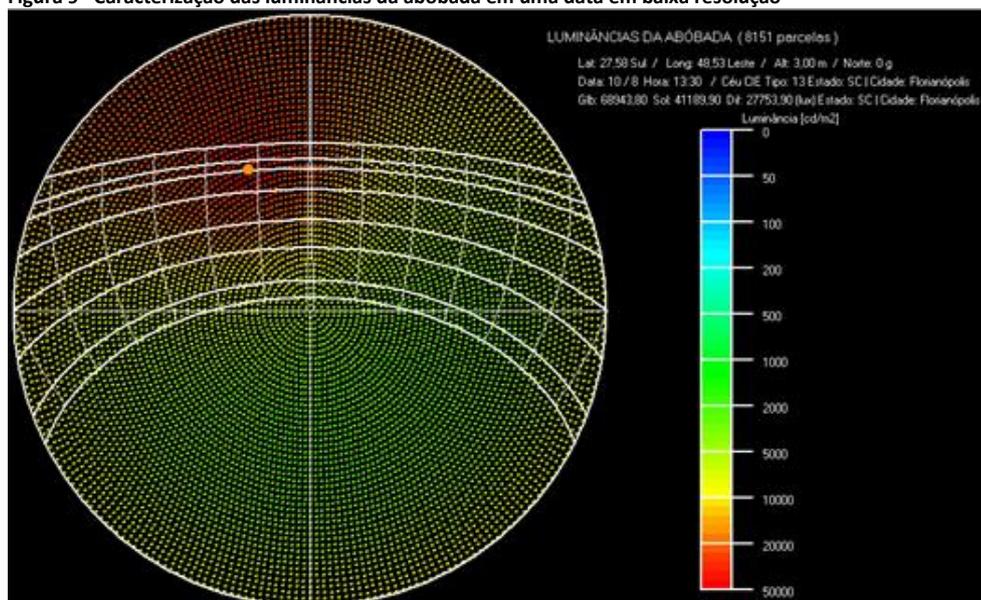
Fonte: o autor.

Caracterização da abóbada no processamento

A representação da abóbada, que corresponde ao hemisfério das direções que estão acima do plano horizontal, em cada Globo, foi feita com a mesma discretização das três resoluções adotadas para a Visibilidade, correspondendo as direções na abóbada à metade daquelas do Globo de onde deriva. Na Figura 10 (A, B e C) estão representadas, como exemplo, abóbadas nas três resoluções, na data de 10 de agosto, às 13 h 30 min, em Florianópolis, para o céu Padra 13 CIE, de tipo limpo com turvamento médio:

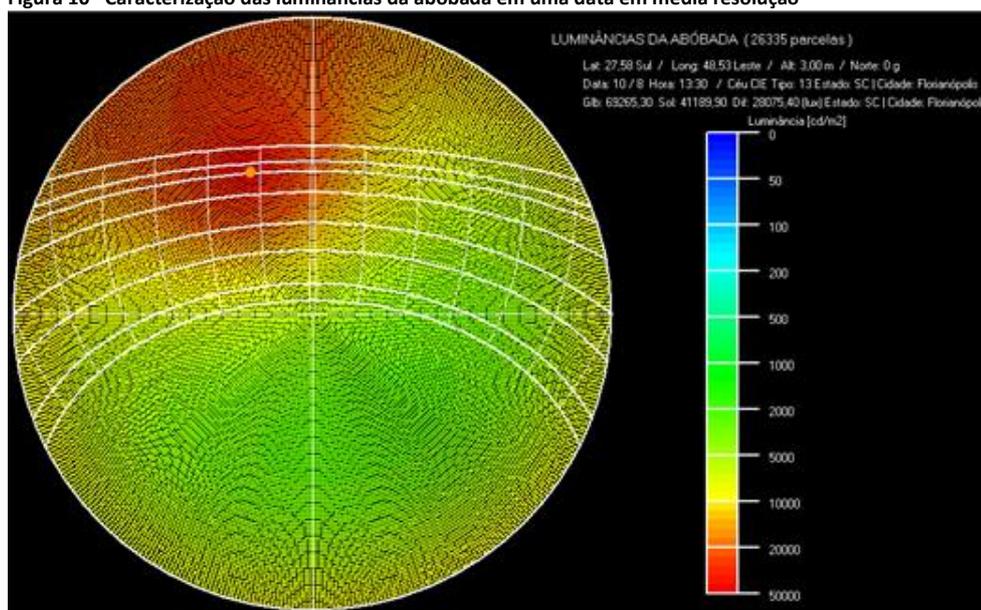
- a) resolução de 8.151 direções no hemisfério da Abóbada (baixa)(Figura 9);
- b) resolução de 26.335 direções no hemisfério da Abóbada (média) (Figura 10);
- c) resolução de 73.099 direções no hemisfério da Abóbada (alta) (Figura 11);

Figura 9 –Caracterização das luminâncias da abóbada em uma data em baixa resolução



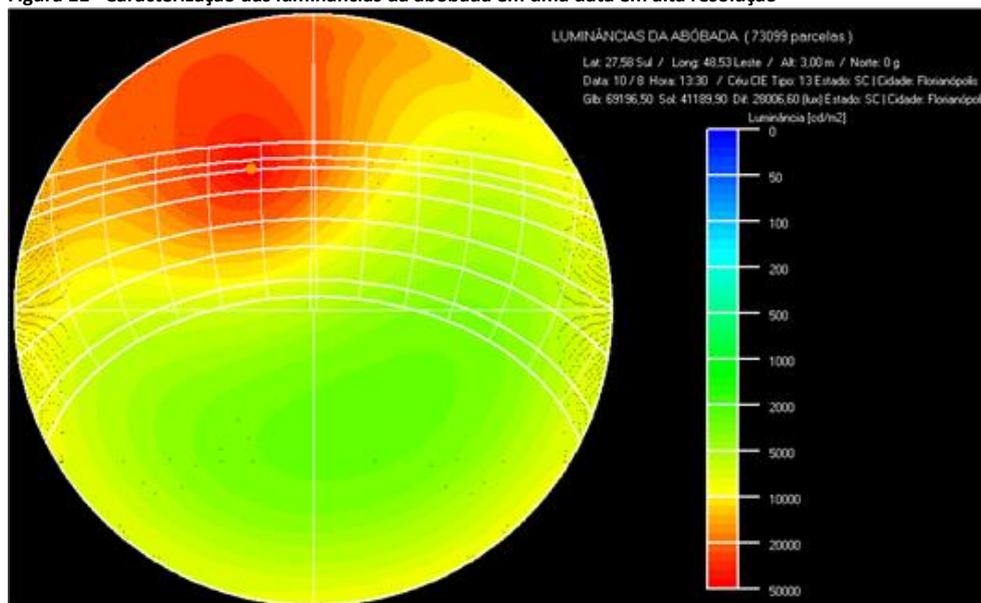
Fonte: o autor.

Figura 10 –Caracterização das luminâncias da abóbada em uma data em média resolução



Fonte: o autor.

Figura 11 –Caracterização das luminâncias da abóbada em uma data em alta resolução



Fonte: o autor.

Da combinação das resoluções de Visibilidade (Fatores de Forma) com a quantidade de vértices dos planos analisados, em cada modelo, pode-se estimar a quantidade aproximada de fatores de forma analisados em cada simulação. A quantidade de direções analisadas para o cálculo dos fatores de forma, em cada modelo, corresponde ao dobro da resolução de cada hemisfério para cada uma das três resoluções, para eles definidas, representando todo o Globo de Visibilidade, para cada um dos quatro Modelos avaliados.

Na Tabela 1 apresenta-se a estimativa de fatores de forma calculados relacionando as três resoluções de visibilidade com o fracionamento de cada modelo.

Tabela 1 –Estimativa de direções calculadas por modelo e grau de Resoluções de Visibilidade

MODELO	Vértices de Análise	Vértices Totais	Globo 4 (8.151)	Globo 6 (26.335)	Globo 8 (73.099)
Modelo TST0_0-1	462	134	17.394.234	56.198.890	155.993.266
Modelo TST1_0-1	462	2.494	20.328.594	65.679.490	182.308.906
Modelo TST2_0-1	734	4.348	35.440.548	114.504.580	317.834.452
Modelo TC_1-0	7.038	30.094	245.296.194	792.525.490	2.199.841.306

Fonte: o autor.

Métricas de Verificação

Para a verificação dos resultados foram usadas duas métricas conhecidas e consagradas: **Daylight Autonomy (DA)** e **a Useful Daylight Illuminances (UDI)**.

A DA é entendida como a porcentagem de tempo de ocupação em um ano na qual a iluminância mínima requerida, em um sensor, é provida apenas pela luz natural (REINHART et al., 2006). Para estas verificações foram definidos dois valores de DA: o primeiro de 500 lux e o segundo de 250 lux. Estes valores foram determinados para cada um dos vértices dos planos de análise, que serão identificados como DA_{n1} e DA_{n2}. Os resultados são calculados usando-se as iluminâncias obtidas para cada vértice, considerando-se o total de horas simuladas válidas (3.480 horas, no caso) como 100 %, computando-se cada hora acima de DA_{n1} e DA_{n2} e transformando o total de horas de cada DA em relação percentual ao total de horas.

A UDI é entendida como Iluminâncias Úteis de Luz Natural. Utilizou-se como referência a proposição mais atual, que estabelece limites inferiores e superiores, assim como um

valor intermediário, conforme a proposição de Mardaljevic (2013). Definiu-se assim um limite inferior de 100 lux, um limite superior de 2.000 lux e uma referência intermediária de 300 lux. Os resultados são obtidos computando-se, para cada hora válida simulada (3.480 horas), o enquadramento da iluminância nos intervalos, segundo a seguinte nomenclatura:

- **UDI_{lo}**: para o intervalo com valores abaixo do limite inferior de 100 lux;
- **UDI_{inf}**: para o intervalo com valores entre o limite inferior de 100 lux e a referência intermediária de 300 lux;
- **UDI_{med}**: para o intervalo com valores entre a referência intermediária de 300 lux e o limite superior de 2.000 lux;
- **UDI_{sup}**: para o intervalo com valores acima do limite superior de 2.000 lux;

Para cada modelo foi realizado o seguinte procedimento:

- a) Determinação, em cada métrica e em cada resolução (Baixa, Média e Alta), do **Valor Médio** da métrica (identificados como **DLC_{med}**, **CR_{med}**, **RADTOT_{med}**, em cada Tabela);
- b) Determinação, em cada métrica, da **Razão Simples** entre os valores absolutos de cada vértice de análise nas relações **CR/DLC** e **RADTOT/DLC**, considerado como **Índice de Divergência**, significando o valor 1 como igualdade dos resultados e calculando-se, para cada métrica, o valor da **Divergência Média** (CR DI e RADTOT DI) assim como o Desvio Padrão dos valores da métrica em relação à sua Divergência Média (CR DP e RADTOT DP), tendo sido calculado ainda o **Desvio Padrão Médio** (DvPdMd, última coluna) entre as divergências de cada métrica em relação a cada razão (CR/DLC e RADTOT/DLC).

Apresentação dos resultados

Na sequência são apresentados os resultados comparativos apenas para o modelo TSTo_0-1, o mais simples, e o modelo TC_1-0, o mais complexo. Na pesquisa as verificações foram feitas para os quatro modelos, mas neste artigo apresentamos apenas os dois limites pelo fato de os resultados dos modelos intermediários apresentarem características de uma grande proporcionalidade, o que representa dois extremos quanto aos diferentes indicadores.

Para garantir a consistência dos resultados gerais, foi feita preliminarmente uma amostragem de comparações entre a simulação dinâmica dos modelos, usando os arquivos climáticos e o método do DLC, com os resultados de simulações estáticas feitas com as referências de abóbada de alguns dias e horas, ao longo do ano, que não estão apresentadas aqui pela extensão dos dados.

Estas verificações estão contempladas nos anexos do relatório completo da pesquisa resumida neste artigo (CLARO, 2015). Foram feitas para mostrar que os resultados obtidos, na verificação do encadeamento de cálculo, usando o DLC, conduzem aos mesmos efeitos que o encadeamento de simulações estáticas, que utilizam os mesmos parâmetros, com a aplicação da Equação da Radiosidade.

A precisão dos procedimentos de simulação estática do MVE, já demonstradas nos trabalhos citados, também se verifica, por extensão, no método do DLC desenvolvido no mesmo contexto do MVE. Foi desta constatação e da avaliação conceitual da proposição inicial dos Coeficientes de Radiosidade, como alternativa ao DLC, que se criou a proposição do método baseado na Radiosidade Plena, como uma terceira alternativa viável para determinar a EALN.

CLARO, A.

Método tripla para estimativa anual de luz natural (EALN) usando radiosidade

Os resultados dos indicadores de comparação entre os diferentes métodos em cada grau de resolução, para o modelo mais simples TSTo_0-1, são apresentados na Tabela 2. Os valores do método **DLC** são representados pelo valor médio obtido em cada uma das métricas analisadas: **DA1, DA2, UDlo, UDlinf, UDImed e UDIsup**. Somente uma linha de referência foi apresentada pois os resultados nas três resoluções do DLC foram iguais. Os primeiros valores (primeira linha da Tabela) são a referência para comparação com os métodos CR e RADTOT.

Tabela 2 – Modelo TSTO_0-1 - Resultados calculados para Valores Médios, Divergência e Desvio Padrão, segundo os Métodos de Cálculo e Resoluções para cada métrica

RESOL.	MÉTODO	DAn1	DAn2	UDI0	UDlinf	UDImed	UDIsup	DsvPdMed
TSTO_0-1	DLCmed	33,4808	49,9239	26,8142	27,9646	32,9644	12,2568	
	CRmed	33,4807	49,9239	26,8142	27,9646	32,9644	12,2568	
	CR DI	1	1	1	1	1	1	
	CR DP	0	0	0	0	0	0	0,000004
	RADTOTmed	33,4807	49,9239	26,8142	27,9646	32,9644	12,2568	
	RADTOT DI	1	1	1	1	1	1	
BAIXA	RADTOT DP	0	0	0	0	0	0	0,000004
	DLCmed	33,5068	49,941	26,7907	28,0149	32,9248	12,2697	
	CRmed	33,5069	49,9409	26,7907	28,0148	32,9249	12,2697	
	CR DI	1	1	1	1	1	1	
	CR DP	0,0001	0	0	0,0001	0,0001	0	0,000043
	RADTOTmed	33,5069	49,9409	26,7907	28,0148	32,9249	12,2697	
MÉDIA	RADTOT DI	1	1	1	1	1	1	
	RADTOT DP	0,0001	0	0	0,0001	0,0001	0	0,000043
	DLCmed	33,4388	49,8711	26,9454	27,914	32,8907	12,2499	
	CRmed	33,4387	49,8711	26,9453	27,9142	32,8905	12,25	
	CR DI	1	1	0,9999	1,0001	1	1	
	CR DP	0	0	0,0009	0,0007	0,0001	0	0,000295
ALTA	RADTOTmed	33,4387	49,8711	26,9453	27,9142	32,8905	12,25	
	RADTOT DI	1	1	0,9999	1,0001	1	1	
	RADTOT DP	0	0	0,0009	0,0007	0,0001	0	0,000295

Fonte: o autor.

Para os dois métodos foram descritos o índice de Divergência (DI) e o Desvio Padrão (DP) de cada métrica, sendo que neste último foi apresentado um desvio padrão médio entre as métricas, com uma casa a mais de precisão para contemplar o arredondamento dos desvios padrões, em cada métrica.

Em todos os indicadores adotados para comparar os resultados, a diferença pode ser considerada insignificante, inclusive mostrando precisão até a 4ª. casa decimal. Somente na alta resolução constata-se alguma diferença nesta precisão, até porque a resolução de cálculo é bem precisa. No entanto, estas diferenças não são relevantes. Pode-se ainda aqui interpretar os resultados como iguais.

Os resultados para o modelo TC_1-0, o mais complexo, são apresentados na Tabela 3, com os mesmos critérios usados para a apresentação do Modelo TSTo_0-1 (que foram também usados nos modelos intermediários, aqui não apresentados, mas que completam a pesquisa). Neste segundo caso mais complexo, nos resultados numéricos obtidos para os três métodos, a análise também é eloquente em demonstrar que, para um mesmo modelo e uma mesma resolução, os três métodos conduzem ao mesmo resultado. Esta equivalência prática dos resultados verificou-se em todos os 12 casos que caracterizam o conjunto de todas as comparações realizadas com a aplicação dos três métodos no estudo: quatro Modelos com três Resoluções cada um.

Embora esperada uma pequena diferença devido aos diferentes procedimentos de cálculo em cada método, usando funções internas da programação com diferentes precisões, as diferenças de precisão não se fizeram perceber quando os resultados que

CLARO, A.

Método tripla para estimativa anual de luz natural (EALN) usando radiosidade

agregam estatisticamente os valores de iluminância, ao longo do ano, foram enquadrados dentro da métrica.

Tabela 3 – Modelo TC_1-0 - Resultados calculados para Valores Médios, Divergência e Desvio Padrão, segundo os Métodos de Cálculo e Resoluções para cada métrica

RESOL.	MÉTODO	DAn1	DAn2	UDI0	UDIinf	UDImed	UDIsup	DsvPdMed
TC_1-0	DLCmed	38,8906	51,7341	32,5743	18,9142	38,5898	9,9218	
	CRmed	38,8904	51,734	32,5744	18,9142	38,5897	9,9217	
BAIXA	CR DI	1	1	1	1	1	1	
	CR DP	0,0024	0,0006	0,0001	0,0002	0,0004	0,0014	0,000829
	RADTOTmed	38,8906	51,7341	32,5742	18,9142	38,5898	9,9218	
	RADTOT DI	1	1	1	1	1	1	
	RADTOT DP	0	0	0	0,0002	0	0	0,000053
	DLCmed	38,9226	51,7881	32,5117	18,9285	38,6197	9,9401	
MÉDIA	CRmed	38,9225	51,7879	32,5118	18,9285	38,6196	9,9401	
	CR DI	1	1	1	1	1	1	
	CR DP	0,0002	0,0001	0,0001	0,0005	0,0004	0,002	0,000549
	RADTOTmed	38,9226	51,7881	32,5116	18,9285	38,6196	9,9402	
	RADTOT DI	1	1	1	1	1	1	
	RADTOT DP	0	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,000081
ALTA	DLCmed	38,8943	51,7554	32,5604	18,912	38,602	9,9255	
	CRmed	38,8942	51,7553	32,5605	18,912	38,602	9,9255	
	CR DI	1	1	1	1	1	1	
	CR DP	0,0005	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001	0	0,000185
	RADTOTmed	38,8944	51,7554	32,5604	18,9119	38,6021	9,9256	
	RADTOT DI	1	1	1	1	1	1	
	RADTOT DP	0	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0004	0,00014

Fonte: o autor.

O que demonstrou maior variabilidade foi a comparação de precisão em relação às diferentes resoluções de Visibilidade, mas mesmo nesta comparação, os resultados numéricos não apresentaram grandes diferenças. Considerando-se como valor de referência o globo de maior resolução (Globo 8), o que se pode observar é que a variação de resolução não apresentou significativa amplitude correspondente de variação nos resultados da métrica, a não ser quando calculado sobre bases percentuais muito pequenas, nas quais um ponto ou dois podem significar diferenças entre 100 e 200%.

Além da comparação numérica entre os resultados obtidos nos quatro modelos processados, pelos três métodos, foram também avaliados comparativamente os tempos de processamento na realização dos cálculos, utilizando-se um Notebook Dell Inspiron, processador Intel Core i5 de 1,8 Ghz, com memória RAM de 6 Gb e sistema Windows10 64 bits. Ressalte-se que o cálculo depende também da velocidade de acesso aos discos rígidos, que não foi avaliada, mas tem impacto significativo, pois há grande proporção de ações de gravação e leitura em disco rígido.

Os valores comparativos para os quatro modelos verificados, são mostrados na Tabela 4, apresentando-se os valores absolutos de tempo de cada método, com cada modelo em cada resolução, assim como tempos comparativos percentualmente, considerando-se o tempo de cálculo do DLC em cada situação como valor referência de 100%.

Na comparação dos tempos de processamento o método mais eficiente relacionou-se, direta e enfaticamente, ao número de elementos a processar: o método do DLC foi mais rápido quando o número de direções do globo era a variável de menor valor; o método do Coeficiente de Radiosidade foi o mais rápido nos casos em que o número de vértices opacos era a variável de menor valor; o método da Radiosidade Plena foi o mais rápido quando o número de horas a simular era a variável de menor valor, conforme apresentado na Tabela 4.

CLARO, A.

Método tripla para estimativa anual de luz natural (EALN) usando radiosidade

Tabela 4 – Tabulação dos tempos de processamento, em minutos (min) e em diferença percentual em relação ao método do DLC (100%), dos 4 modelos nas resoluções Baixa, Média e Alta para cada um dos 3 métodos

RESOLUÇÃO DO GLOBO	MÉTODO	TST0_0-1. 1.672 vértices	TST1_0-1. 2.032 vértices	TST2_0-1. 3.614 vértices	TC_1-0 22.918 vértices
BAIXA: 8.151 dir.	DLC (min)	38	54	169	1.246
	DLC (%)	100	100	100	100
	CR (min)	17	22	75	2.616
	CR (%)	44,7	40,7	44,4	210
	RADTOT (min)	63	83	150	1.079
	RADTOT (%)	165,8	153,7	88,8	86,6
MÉDIA: 26.335 dir.	DLC (min)	133	200	740	6.738
	DLC (%)	100	100	100	100
	CR (min)	25	36	107	3.890
	CR (%)	18,8	18	14,5	57,7
	RADTOT (min)	75	93	203	1.414
	RADTOT (%)	56,4	46,5	27,4	21
ALTA: 73.099 dir.	DLC (min)	383	588	2.115	16.070
	DLC (%)	100	100	100	100
	CR (min)	40	57	146	4.737
	CR (%)	10,4	9,7	6,9	29,5
	RADTOT (min)	93	118	253	2.155
	RADTOT (%)	24,3	20,1	12	13,4

Fonte: o autor.

É importante observar que, para os Modelos estudados, nos diferentes graus de resolução de Visibilidade, em nenhum dos casos o método do DLC mostrou-se o mais rápido, pelo menos conforme implementado no método da Radiosidade, disponível no Programa Apolux. O método mais eficiente em 9 das 12 comparações feitas, entre os três métodos, foi o Coeficiente de Radiosidade, chegando quase a equiparar-se ao tempo gasto na alta resolução deste método, com os tempos da baixa resolução do método do DLC. O método da Radiosidade Plena foi mais eficiente nos três restantes. Esta relação de eficiência está claramente associada à quantidade de vértices analisados em cada modelo. Observando-se a redução percentual de tempo do método mais eficiente para a referência DLC, em todos os 12 casos, ela é tanto mais significativa quanto maior a resolução

Além da questão do tempo de processamento, temos que considerar que há diferenças entre os dados que são disponibilizáveis em cada um dos métodos, após a simulação anual.

Considere-se a disponibilidade em cada método dos seguintes valores: a) Iluminância Final (E_{fim}) Total nos Planos de Análise; b) Iluminância Inicial (E_{ini}) Total nos Planos de Análise; c) Iluminância Inicial Direta (Sol) nos Planos de Análise; d) Iluminância Final Total nos demais Planos Protagonistas (que contribuem com as inter-reflexões nos Planos de Análise na Radiosidade); e) Iluminância Inicial Total nos Planos Protagonistas; f) Iluminância Inicial Direta (Sol) nos Planos Protagonistas;

Além da disponibilidade destes valores, também se considerou, para cada método, a possibilidade ou não de mudança nas transmitâncias dos planos transmissores (especulares e difusos) e a possibilidade de mudança na refletância dos planos opacos difusos e transmissores difusos. Nos métodos do DLC e do CR esses valores estão entronizados nos coeficientes calculados. Já no método da Radiosidade Plena as transmitâncias de especulares estão conectadas à Visibilidade, o que não acontece com as refletâncias de opacos difusos e refletâncias/transmitâncias dos transmissores difusos, dependendo do projeto corrente na hora do cálculo da Radiosidade Plena. Entretanto, o tempo necessário ao cálculo da Visibilidade, comparado ao tempo total, é bastante reduzido e pode permitir a modificação dos transmissores especulares sem grande custo adicional de computação.

As possibilidades disponíveis em cada método estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição da Disponibilidade de grandezas após o cálculo segundo cada um dos métodos (Iluminância E).

GRANDEZA	DLC	CR	RADTOT
E_{fim} final total análise	SIM	SIM	SIM
E_{ini} inicial total análise	NÃO	SIM	SIM
E_{ini} direta análise	NÃO	SIM	SIM
E_{fim} total protagonistas	NÃO	NÃO	SIM
E_{ini} total protagonistas	NÃO	SIM	SIM
E_{ini} direta protagonistas	NÃO	SIM	SIM
Mudança de refletância / transmitância protagonistas	NÃO	NÃO	SIM

Fonte: o autor.

Observa-se que o método da Radiosidade Plena é o que permite acesso a todas as grandezas calculadas no procedimento de determinação da EALN, hora a hora, possibilitando com maior facilidade a modificação de dados do projeto original, sem recalculando a Visibilidade, caso não haja mudança nos transmissores especulares (exigindo-se aqui nova Visibilidade), simplesmente determinando-se novo cálculo da EALN. Nos outros dois métodos, estas modificações manteriam a Visibilidade (como no anterior, exceto para transmissores especulares), mas exigiriam a determinação novamente dos Daylight Coefficients (DLC) ou Coeficientes de Radiosidade (CR) para posterior determinação da nova EALN, já que tais valores estão entronizados no procedimento de determinação destes coeficientes. Optou-se, então, na construção do algoritmo, permitir ao usuário determinar qualquer dos três métodos utilizar (mesmo que este não fosse recomendado pelo programa, como o provavelmente mais rápido), uma vez que pode haver interesse numa maior disponibilidade de dados, apesar de maior dispêndio de tempo no método que pode disponibilizar os dados desejados.

Conclusões

Inicialmente pode-se concluir que o método de determinação da Estimativa Anual de Luz Natural (EALN), utilizando o conceito clássico de DLC no contexto metodológico da Radiosidade, particularmente no do Modelo Vetorial Esférico (MVE), conforme apresentado neste trabalho, constitui-se em uma proposição inovadora, tendo sido validado através de uma avaliação comparativa com amostragem de simulações estáticas com parâmetros correspondentes.

Pode-se concluir também que tanto o método dos Coeficientes de Radiosidade quanto o da Radiosidade Plena são válidos e mostraram conduzir aos mesmos resultados que o método do DLC, com uma igualdade prática de resultados. O método dos Coeficientes de Radiosidade indicou, nos casos estudados, ser mais eficiente e permitir estudos de maior precisão em menos tempo, concluindo-se ainda a possibilidade que, alternativamente, até mesmo a abordagem de Radiosidade Plena possa ser mais eficiente que ambos os coeficientes.

Verificou-se que há uma diferença significativa entre os diferentes tempos de processamento, mostrando que o aumento de tempo, em função da resolução de Visibilidade, não acrescentou grande diferença nos resultados numéricos. Pode-se ainda concluir que a Alta Resolução (Globo 8) não precisa necessariamente ser usada, mesmo no modelo mais complexo.

A verificação da eficiência dos três métodos, relacionada ao tempo de processamento, demonstrou a correção da hipótese inicial no que tange à relação entre número de direções do globo, número de vértices do projeto e número de horas a avaliar na simulação dinâmica. O procedimento da Radiosidade Plena poderá também fornecer, futuramente, dados importantes para estudos envolvendo o ofuscamento ao longo do

ano, tendência mais atual das simulações dinâmicas usando arquivos climáticos. O método do CR apresenta uma situação intermediária entre o DLC e a Radiosidade Plena, em que se conhece a Iluminância inicial dos vértices protagonistas do ambiente, o que permitirá uma análise mais detalhada que o método do DLC, embora mais restrita que o método da Radiosidade Plena.

Há que se considerar, por fim, que os métodos foram aplicados em forma plena, sem nenhum tipo de otimização, como o refinamento progressivo. Pode-se conceber abordagens onde pequenas iluminâncias iniciais sejam desprezadas, ou ainda hipóteses em que Visibilidades entre vértices muito reduzidas também sejam descartadas, ou ainda valores de coeficientes - DLC ou CR – muito pequeno sejam também descartados, diminuindo um pouco a precisão, mas ampliando a capacidade e rapidez de processamento de ambientes de alta complexidade. Há também possibilidades de abordagens estatísticas, como o método Monte Carlo, que ainda não tiveram sua aplicação considerada no Modelo Vetorial Esférico até este trabalho, mas que se apresenta como possibilidade futura.

Referências

CIE. COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **Spatial Distribution of Daylight. CIE Standard General Sky: ISO 15469: 2004(E) / CIE S 011/E:2003**. Vienna: CIE Central Bureau, 2004.

CLARO, A. **Método para Determinação da Estimativa Anual de Luz Natural Utilizando o Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade**. 2015. 165 f. Tese (Concurso para Professor Titular) – Centro Tecnológico, Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/136390/ANDERSON%20CLARO%20-%20TESE%20TITULAR%20UFSC%20OUTUBRO%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 26 de jan. 2021.

CLARO, A. **Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade Aplicado à Iluminação Natural**. 1998. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/77897>. Acesso em 26 jan. 2021.

COHEN, M. F.; CHEN, S. E.; WALLACE, J. R; GREENBERG, D. P. A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation. **Computer Graphics**, v.22, n.4, 1988, p. 75-84. Disponível em: http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15462-f10/www/lec_slides/p75-cohen.pdf. Acesso em: 27 jan. 2021.

COHEN, M. F.; GREENBERG, D. P. The Hemi-Cube: a Radiosity Solution for Complex Environments. In: **ACM SIGGRAPH Computer Graphics**, v. 19, n. 3, p. 31-40, jul., 1985. DOI: <https://doi.org/10.1145/325165.325171>.

GEEBELLEN, B. **Daylighting Computation Methods - From Dot Chart to Digital Simulation**. Syllabus Studiedag Daglichttoetreding in Gebouwen, Antwerpen: KVIV, 2003. Disponível em: https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/160607/1/kviv_geebelen.pdf%20- Acesso em: 27 jan. 2021.

MORO, J.; KRUGER, E.; CLARO, A. **Análise por meio de Simulação Computacional dos Sistemas de Iluminação do Edifício Sede do Tribunal de Contas do Paraná**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., Maceió, 2014. **Anais [...]**, Maceió: UFAL, 2014. DOI: <http://doi.org/10.17012/entac2014>.

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution – Preliminary configuration and validation. **Solar Energy**, v. 50, n. 3, p 235-245. 1993.

TREGENZA, P. R. The Monte Carlo method in lighting calculations. **Lighting Research and Technology**. v.5, n. 4, p. 163-170. 1983. DOI: <https://doi.org/10.1177/096032718301500401>.

TREGENZA, P. R.; WATERS, I. Daylight coefficients. **Lighting Research and Technology**, v. 49, n. 7, p. 65-71. 1983. DOI: <https://doi.org/10.1177/1477153516653786>

CLARO, A.

Método triplo para estimativa anual de luz natural (EALN) usando radiosidade

WARD, G. J. The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System. Computer Graphics. In: SIGGRAPH'94, 1994, Orlando. **Proceedings [...]**. Orlando: Association for Computing Machinery, 1994, p. 459-72. Disponível em: <http://radsite.lbl.gov/radiance/papers/sg94.1/> . Acesso em 27 jan. 2021.

WHITTED, T. An Improved Illumination Model for Shaded Display Graphics and Image Processing. **Communications of the ACM**, New Jersey, v. 23, n. 6. 1980. DOI: <https://doi.org/10.1145/358876.358882>

1 Anderson Claro

Arquiteto Urbanista. Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo. Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade de Santa Catarina. Professor Titular na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Arquitetura. Endereço Postal: Rod. SC401 José Carlos Daux, no 7.050, Florianópolis – SC, Brasil, CEP 88050-000