

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO**

ANDERSON CLARO

**MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA ESTIMATIVA ANUAL DE LUZ NATURAL
UTILIZANDO O MODELO VETORIAL ESFÉRICO PARA RADIOSIDADE**

Tese apresentada à Banca para Progressão a Professor
Titular do Departamento de Arquitetura e Urbanismo –
Centro Tecnológico, da Universidade Federal de Santa
Catarina.

Florianópolis
11 de dezembro de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor

Maiores informações em:

<http://portalbu.ufsc.br/ficha>

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO**

ANDERSON CLARO

**MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA ESTIMATIVA ANUAL DE LUZ NATURAL
UTILIZANDO O MODELO VETORIAL ESFÉRICO PARA RADIOSIDADE**

Esta Tese foi julgada adequada para progressão a Professor Titular do Departamento de Arquitetura e Urbanismo – CTC / UFSC e aprovada em sua forma final pelo Programa De Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PosArq / UFSC.

Florianópolis, 11 de dezembro de 2015

Prof. Dr. Fernando Barth

Coordenador do PosArq – CTC / UFSC

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Paulo Cesar Philippi
Universidade Federal de Santa Catarina**

**Prof. Dr. Benamy Turkienicz
Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

**Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim
Universidade Federal da Bahia**

**Prof. Dr. Henor Artur de Souza
Universidade Federal de Ouro Preto**

RESUMO

A hipótese de trabalho adotada é que, considerando-se a necessidade de estudos de ambientes complexos em geometria e caracterização de materiais, o Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade permite uma abordagem alternativa ao Daylight Coefficient - DLC, abordagem esta baseada num comportamento padrão de trocas luminosas entre as superfícies do ambiente que definiremos como Coeficientes de Radiosidade. Para isto foram elaborados modelos conceituais para conversão de tipos de céu segundo a norma a partir de arquivos climáticos, assim como a conceituação do DLC segundo o Modelo Vetorial Esférico, assim como duas abordagens alternativas denominadas Coeficientes de Radiosidade – CR, e Radiosidade Plena. O objetivo do trabalho é propor um novo método de determinação de **Estimativa Anual de Luz Natural – EALN** para ambientes complexos, baseada em arquivos climáticos e calculada a partir de **Coeficientes de Radiosidade** ou de **Radiosidade Plena** alternativamente ao Daylight Coefficient - **DLC**, utilizando os Padrões de Céu da Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E 2003. A verificação dos conceitos foi realizada em 3 etapas: na primeira foi avaliada a manipulação e conversão de dados dos arquivos climáticos; na segunda verificados os modelos de conversão e seleção de tipos de céu segundo a norma; na terceira foram verificados os conceitos de DLC, CR e Radiosidade Plena através da aplicação do Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade, estudando-se comparativamente os resultados e suas validações. Os resultados das etapas de verificação demonstraram a plena viabilidade e consistência dos modelos propostos, constituindo ferramenta prática, da perspectiva de qualidade dos resultados e velocidade de processamento.

Palavras-Chave: Iluminação Natural em Arquitetura e Urbanismo; Eficiência Energética; Estimativa Anual de Luz Natural; Radiosidade

ABSTRACT

The working hypothesis adopted is that, considering the need for studies of complex environments in geometry and materials characterization, the Spherical Vector Model for radiosity allows an alternative approach to the Daylight Coefficient – DLC. This new approach is based on a default behavior of light trading between environmental surfaces here defined as Radiosity Coefficients. For this conceptual models were developed for sky types of conversion according to standard from weather files as well as the conceptualization of DLC according to the Spherical Vector Model as well as two alternative approaches called Radiosity Coefficients - CR - and Full Radiosity. The objective is to propose a new method of determining Estimated Annual Natural Light - EALN for complex environments , based on weather files and calculated from radiosity coefficients or full radiosity alternatively to Daylight Coefficient - DLC using the sky standards ISO 15469- 2004 (E) CIE S 011-E 2003 . The verification of concepts was held in three stages: the first evaluated the handling and conversion data from climate archives; the second checked conversion models and selection of types of sky according to standard ; the third were checked DLC concepts , CR and Full Radiosity by applying the Spherical Vector Model for Radiosity, by studying the comparative results and their validations. The results of the verification steps shown full feasibility and consistency of the proposed models, providing a practical tool, the quality of results and processing speed perspective.

Keywords: Natural Lighting in Architecture and Urban Design; Energy Efficiency; Estimated Annual Natural Light; Radiosity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema original do método Ray Tracing e do conceito de “árvore de raios”	18
Figura 2: Esquema conceitual e formulação matemática da equação da Radiosidade.....	19
Figura 3: Representação gráfica do Modelo do Hemi Cubo.....	19
Figura 4: Representação da “árvore” de raios derivadas da visualização de um pixel de imagem.	20
Figura 5: Comparação em imagem dos conceitos básicos dos modelos Ray Tracing e Radiosidade.....	21
Figura 6: Estrutura de Análise da Luz Natural.....	26
Figura 7: Representação genérica definindo a posição do Sol e de um elemento genérico do Céu.....	34
Figura 8: Fluxograma de cálculo do programa Daysim, destacando o comando <i>gen_dc</i>	40
Figura 9: Comparação do modelo de Tregenza, com cones de abertura em torno de 10.15 graus (a) e o modelo adotado no Daysim e DDS, com segmentos contínuos.....	41
Figura 10: Exemplo de posições solares para o DLC direto na localidade de Freiburg, Germany (47.98°N).....	42
Figura 11: Interpolação da contribuição do Sol da posição efetiva para as posições pré-calculadas.....	42
Figura 12: Mapeamento de azimutes / alturas solares considerando todo o hemisfério, para cálculo da componente DLC direta – indireta no modo DDS. Anotadas as posições solares exemplificadas na Figura 9, no modo clássico.....	43
Figura 13: a) Ambiente de Escritório Isolado ; b) Edifício de Escritórios.....	45
Figura 14(a)(b): Estudo de simplificação morfológica analisando diferentes configurações de edifício e a implicação de sua transformação em prismas quadrangulares.....	47
Figura 15: Resultados gráficos de simulação em segmento urbano considerando: um ciclo de interações (a) e 3 ciclos de interações (b) na avaliação de um DA para 500 lux.....	48
Figura 16: Ambiente típico de escritório, representado por 278.695 triângulos e 11 materiais distintos.....	50
Figura 17: ilustração do conceito de “salto” (<i>bouce</i>) na amostragem de um ambiente.....	51
Figura 18: Comparativo de tempo de processamento com duas amostragens de raios distintas e 5 “saltos”.....	52
Figura 19: Representação do conceito de Divisões do Ambiente, que determina o conjunto de raios primários em um sensor ou um ponto de vista.....	52
Figura 20: Dois exemplos de como o Radiance trata situações de maior complexidade, inclusive encontrando limites.....	53
Figura 21: Gráfico do tempo de processamento, em segundos, utilizado pelo comando RTRACE conforme o número de raios primários emitidos a partir de um sensor ou ponto de vista.....	54
Figura 22: Estudo de validação dos cálculos realizados em CPU e através da placa gráfica – GPU.....	54
Figura 23: Representação gráfica do Globo de Vetores e de uma projeção de abóbada nele representada.....	57
Figura 24: Exemplo de um modelo tridimensional de um projeto de simulação, criado como simplificação do Projeto de simulação desenvolvido por Pinto (2014) para avaliação do Tribunal de Contas do Paraná, em Curitiba-Pr.....	58
Figura 25: Exemplo de determinação da projeção de um triângulo no Globo de Vetores.....	59
Figura 26: Corte esquemático representando a análise das projeções e a Máscara de Visibilidade correspondente.....	60
Figura 27: Imagens obtidas de uma situação do entorno de análise, com a câmera na posição vertical.....	62
Figura 28: Ambiente estudado no Departamento de Arquitetura e Urbanismo – UFSC, com especificações do projeto e imagem do ambiente.....	63
Figura 29: Imagens importadas no Apolux originadas na IQC-Cam, mostrando a distribuição da luminância em um céu real em 13 mar. 2008, 14h: a) Abóbada celeste – plano de referência horizontal; b) Entorno – plano de referência vertical; c) Combinação em 3D dos dois planos.....	63
Figura 30: Gráfico com os desvios de resultados simulados no programa Apolux em relação à situação real medida.....	64
Figura 31: Esquema metodológico de verificação dos protocolos de testes do Relatório CIE 171	65

aplicados ao Programa APOLUX.....	
Figura 32: Modelos básicos de verificação dos protocolos testados na avaliação do Programa APOLUX.....	66
Figura 33: Descrição da geometria e localização dos pontos de medição no ambiente interno dos protocolos.....	67
Figura 34: Cálculo da Componente Celeste (a) e da Componente Refletida Externa (b) para uma abertura na fachada e uma máscara vertical externa. Adaptado de CIE 171:2006, p. 42.....	68
Figura 35: esquema de distribuição de luminárias e de pontos de avaliação indicados no Relatório CIE para os protocolos de iluminação artificial.....	70
Figura 36: Resultados da comparação entre os valores de iluminância obtidos para uma linha dos pontos de análise.....	70
Figura 37: Resultados da comparação para os valores médios de iluminância indireta segundo as diferentes refletâncias.....	71
Figura 38: (a) Edifício Tribunal de Contas do Estado do Paraná, em Curitiba-PR.....	73
Figura 39: (a) Imagem da simulação de luz natural no piso térreo. (b) Gráfico Daylight Autonomy – DA obtido a partir do DLF e do gráfico de ocorrência de iluminâncias externas.(c) Imagens do Mascaramento de Sombras de um ponto na fachada do modelo tridimensional.....	74
Figura 40: Algoritmo de definição do índice de atendimento aos descritores em cada tipo de céu no <i>step</i> – Passo 1.....	81
Figura 41: Algoritmo de construção das listas de prioridades dos índices de cada tipo de céu no <i>step</i> – Passo 2.....	82
Figura 42: Algoritmo de cálculo das Iluminâncias Difusas Horizontais dos tipos as listas, segundo as prioridades, no <i>step</i> – Passo 3.....	83
Figura 43: Algoritmo de comparação dos desvios nas Iluminâncias Difusas Horizontais calculadas em cada lista e seleção do tipo de céu específico do <i>step</i> – Passo 4.....	84
Figura 44: Resoluções possíveis do Globo de Vetores e quantidade de Direções de cada uma, segundo a versão atual do APOLUX.....	86
Figura 45: Visualização dos modelos utilizados na avaliação da precisão da visibilidade em cada Globo.....	87
Figura 46: comparação entre as projeções de máscaras de um ponto segundo 4 globos diferentes.....	87
Figura 47: Exemplos comparativos das diferenças de resolução das máscaras em 2 pontos distintos nos 2 ambientes analisados, a 10 m da janela e a 2 m da janela.....	88
Figura 48: Algoritmo de representação lógica do procedimento de cálculo do Daylight Coefficient DLC.....	91
Figura 49: Algoritmo de representação lógica do procedimento de cálculo do Coeficiente de Radiosidade CR.....	93
Figura 50-a: Parte inicial da planilha de verificação, contendo os dados horários do EPW.....	98
Figura 50-b: Parte final da planilha de verificação, contendo os dados horários do EPW.....	98
Figura 51: Dados de Belém (LABEEE), em Janeiro.....	99
Figura 52: Dados de Curitiba (LABEEE), em Abril.....	99
Figura 53: Dados de Florianópolis (LABEEE), em Julho.....	100
Figura 54: Dados de Florianópolis (Energy Plus), em Julho.....	101
Figura 55: Dados de Tokyo (Energy Plus), em Julho.....	101
Figura 56 (a)(b): Fac-simile de um segmento com algumas linhas da Planilha de Seleção dos Tipos de Céu obtida para Florianópolis / LABEEE.....	104
Figura 57: Parâmetros de simulação estática para comparação com os de simulação dinâmica (assinalados com destaque em vermelho).....	111
Figura 58: <i>Fac-símile</i> da tabela de comparação de dados entre simulação dinâmica e estática, em Florianópolis, no dia 19 de janeiro, às 11:00 h, com céu do tipo 6,(parcialmente encoberto sem Sol).....	112
Figura 59: Imagens do Modelo TST0_0-1 com desenho em CAD (a), Planta Perspectivada Fracionada (b), Vista Perspectivada Fracionada (c) e Vista Perspectivada em Superfícies (d).....	114
Figura 60: Imagens do Modelo TST1_0-1 com desenho em CAD (a), Planta Perspectivada Fracionada (b), Vista Perspectivada Fracionada (c) e Vista Perspectivada em Superfícies (d).....	115
Figura 61: Imagens do Modelo TST2_0-1 com desenho em CAD (a), Planta Perspectivada Fracionada (b), Vista Perspectivada Fracionada (c) e Vista Perspectivada em Superfícies (d).....	116
Figura 62: Tribunal de Contas do Paraná – Ed. Sede e Anexo.....	116

Figura 63: Planta simplificada do modelo gerado a partir de Pinto (2014). Destacado em vermelho o conjunto de 13 salas.....	117
Figura 64: Imagens do Modelo TC_1-0 com desenho em CAD (a), Vista Perspectivada no CAD (b), Planta Perspectivada Fracionada (c), Vista Perspectivada Fracionada (d), Vista Perspectivada em Superfícies (e), Detalhe Perspectivado em Superfícies (f).....	118
Figura 65: Imagem projetada de uma abóbada gerada para Florianópolis no Apolux com a resolução de 8.151 direções (metade do Globo 4).....	119
Figura 66: Imagem projetada de uma abóbada gerada para Florianópolis no Apolux com a resolução de 26.335 direções (metade do Globo 6).....	119
Figura 67: Imagem projetada de uma abóbada gerada para Florianópolis no Apolux com a resolução de 73.099 direções (metade do Globo 8).....	120
Figura 68: Gráficos de resultados obtidos para o Modelo TST0_0-1 segundo as métricas adotadas.....	129
Figura 69: Gráficos de resultados obtidos para o Modelo TC_1-0 segundo as métricas adotadas.....	130
Figura 70: Razão entre os valores de DAn2 calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TST2, por vértice de análise.....	131
Figura 71: Razão entre os valores de UDImed calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TST2, por vértice de análise.....	132
Figura 72: Razão entre os valores de UDIsup calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TST2, por vértice de análise.....	132
Figura 73: Razão entre os valores de DAn2 calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TC, por vértice de análise.....	133
Figura 74: Razão entre os valores de UDImed calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TC, por vértice de análise.....	133
Figura 75: Razão entre os valores de UDIsup calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TC, por vértice de análise.....	134
Figura 76: Ilustração de Pulso de Erro Sistemático na determinação dos Fatores de Forma em diferentes resoluções no Modelo Vetorial Esférico – MVE.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre algumas características dos métodos Ray Tracing e Radiosidade....	21
Tabela 2: Categorias de brilho do céu ϵ	29
Tabela 3: Coeficientes discretos a_i , b_i , c_i e d_i	30
Tabela 4: Coeficientes intermediários para determinação dos coeficientes de modelagem, por categoria de claridade ϵ	31
Tabela 5 (a): Padrões de céu gerados pela combinação de Graduação (em número romano). Indicatriz (número arábico). Céus de 1 a 7.....	33
Tabela 5 (b): Padrões de céu gerados pela combinação de Graduação (em número romano). Indicatriz (número arábico). Céus de 8 a 15.....	33
Tabela 6: Parâmetros para a fórmula de determinação da distribuição de luminâncias de cada tipo de céu, com a descrição das características de cada um dos 15 tipos.....	35
Tabela 7: Valores típicos de descritores associados com cada tipo de céu.....	36
Tabela 8: Parâmetros para a formulação de cálculo da Luminância do Zenith segundo os tipos de céu, em unidades absolutas.....	37
Tabela 9: Fac simile da tabela de Programas de Simulação Dinâmica segundo o engenho e algoritmos de cálculo, com endereço do site (obs. não foram visitados todos).....	38
Tabela 10: Relação de Programas de Simulação de Iluminação, indicando endereço na internet, disponibilidade e comentários sobre cada um (obs. sites não todos visitados).....	39
Tabela 11: Resultados da simulação no sensor do ambiente isolado para cada um dos 6 métodos ensaiados. O método 6 apresenta os resultados de tempo para o cálculo da iluminância global (DC total) e difusa (DC diffuse) separadamente.....	46
Tabela 12: Resultados da simulação no sensor (2) do edifício para 3 dos métodos ensaiados: (1), (5) e (6). O método (6) apresenta os resultados de tempo para o cálculo da iluminância global (DC total) e difusa (DC diffuse) separadamente. (Os autores não publicam ou comentam o resultado do sensor 1 deste caso).....	46
Tabela 13: Tempos de Processamento e grau de aceleração em relação ao método Radiance / Daysim.....	49
Tabela 14: Mapa de Resultados dos protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14 indicando o número de simulações realizadas e os descartes.....	68
Tabela 15: Resumo dos resultados percentuais com as ocorrências válidas para os protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14.....	69
Tabela 16: Iluminâncias calculadas pelo método analítico do Relatório CIE 171 pelos Programas APOLUX e LightTool, indicando os desvios dos resultados em relação às referências do protocolo (%)......	71
Tabela 17: Combinações possíveis de enquadramento de um step segundo os 3 descritores.....	80
Tabela 18: Resultados comparativos dos valores calculados nas diferentes máscaras para Percentual da Abóbada e Componente Celeste (CC) em cada ponto.....	89
Tabela 19: Desvio Padrão e Média entre valores absolutos e relativos de Iluminância Global e Difusa para Belém – Pa, Brasília – DF e Florianópolis – SC.....	103
Tabela 20: Valores de Média, Desvio Padrão, Valores de Mínimo e de Máximo obtidos para a Divergência horária entre iluminâncias difusas do tipo de céu e da conversão luminosa, em diferentes localidades brasileiras.....	107
Tabela 21: Frequência de ocorrência das Divergências horárias segundo intervalos específicos para cada cidade / arquivo processado, indicada em percentual do Total de horas em cada processamento.....	108
Tabela 22: Frequência de ocorrência das Divergências horárias considerando-se valores até 5%, 25% e 50% para cada cidade / arquivo processado, indicada em percentual do Total de horas em cada processamento.....	109
Tabela 23: Soma anual das iluminâncias difusas horizontais horárias calculadas pelo Apolux na conversão luminosa e em função do tipo de céu adotado, com a diferença absoluta e percentual entre elas.....	110
Tabela 24: Modelo TST0_0-1 - Resultados calculados para Valores Médios, Divergência e Desvio Padrão, segundo os Métodos de Cálculo e Resoluções para cada métrica.....	125
Tabela 25: Modelo TST1_0-1 - Resultados calculados para Valores Médios, Divergência e Desvio Padrão, segundo os Métodos de Cálculo e Resoluções para cada métrica.....	126
Tabela 26: Modelo TST2_0-1 - Resultados calculados para Valores Médios, Divergência e	127

Desvio Padrão, segundo os Métodos de Cálculo e Resoluções para cada métrica.....	
Tabela 27: Modelo C_1-0 - Resultados calculados para Valores Médios, Divergência e Desvio Padrão, segundo os Métodos de Cálculo e Resoluções para cada métrica.....	128
Tabela 28: Valores de Média das Métricas, Média das Divergências e Desvio Padrão das Divergências em cada razão (Média/Alta e Baixa/Alta) para cada Modelo.....	135
Tabela 29: Comparativo entre os tempos de processamento por etapa e total para o Modelo TST0_0-1, para cada uma das 3 Resoluções, segundo cada um dos 3 Métodos, destacado o mais rápido.....	137
Tabela 30: Comparativo entre os tempos de processamento por etapa e total para o Modelo TST1_0-1, para cada uma das 3 Resoluções, segundo cada um dos 3 Métodos, destacado o mais rápido.....	137
Tabela 31: Comparativo entre os tempos de processamento por etapa e total para o Modelo TST2_0-1, para cada uma das 3 Resoluções, segundo cada um dos 3 Métodos, destacado o mais rápido.....	138
Tabela 32: Comparativo entre os tempos de processamento por etapa e total para o Modelo TC_1-0, para cada uma das 3 Resoluções, segundo cada um dos 3 Métodos, destacado o mais rápido.....	138
Tabela 33: Comparativo entre os tempos de processamento totais gastos no processamento de cada Modelo, em cada uma das 3 Resoluções, segundo cada um dos 3 Métodos, destacado o mais rápido.....	139
Tabela 34: Tempos de processamento por elementos unitários, em minutos por unidade, para cada modelo em cada resolução segundo cada método.....	140
Tabela 35: Tempos de processamento, em minutos 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.....	145

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classe de para definição das variáveis complexas do tipo step para caracterização de um tipo de céu.....	79
Quadro 2: Estimativa de direções analisadas em cada uma das 3 Resoluções definidas, para cada um dos 4 Modelos avaliados.....	120
Quadro 3: Resumo das Simulações de Verificação descrito considerando 4 Modelos, 3 Resoluções de Visibilidade e 3 Métodos de Determinação da EALN.....	123
Quadro 4: Disponibilidade de grandezas após o cálculo segundo cada um dos métodos (Iluminância indicada como E).....	146

LISTA DE ABREVIATURAS

CIE - Commission Internationale de l'Éclairage

LabCon – Laboratório de Conforto Ambiental – ARQ / UFSC

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética das Edificações – ECV / UFSC.

DLC – Daylight Coefficient.

CR – Coeficiente de Radiosidade.

MVE – Modelo Vetorial Esférico.

EALN – Estimativa Anual de Luz Natural.

SUMÁRIO

1	JUSTIFICATIVA	14
1.1	HIPÓTESE DE TRABALHO.....	15
1.2	OBJETIVO GERAL.....	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MODELOS FISICAMENTE CONSISTENTES DE ESTUDO DA ILUMINAÇÃO NATURAL: <i>RAY-TRACING E RADIOSITY</i>	17
2.1.1	-Ray Tracing e Ray Tracing Recursivo	17
2.1.2	Radiosidade Plena e Refinamento Progressivo	18
2.1.3	Principais Aspectos Comparativos Entre os Modelos	20
2.2	A SIMULAÇÃO DINÂMICA BASEADA EM ARQUIVOS CLIMÁTICOS E O MODELO DE PEREZ.....	22
2.2.1	O Conceito de Daylight Cefficient – DLC	23
2.2.2	Fundamentos Conceituais e Bases Empíricas do Modelo de Perez	27
2.2.3	Formulação Matemática do Modelo de Perez	27
2.2.4	O Método de Distribuição de Luminâncias do Modelo de Perez	30
2.2.5	Os Novos Padrões de Céu da Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E	32
2.3	PROCESSOS BASEADOS NO MODELO DE PEREZ E NA PLATAFORMA RADIANCE.....	38
2.3.1	Característica da Simulação Dinâmica Baseada nos Engenhos de Cálculo do Daysim / Radiance	40
2.3.2	Trabalho 1: Comparação do Estado da Arte de Seis Métodos Baseados na Plataforma Radiance (2000)	44
2.3.3	Trabalho 2: Estudo de Área Urbana Naturalmente Iluminada Através de Simulação (2012)	46
2.3.4	Trabalho 3: Estudo Comparado de Performance de Simulação CPU X Placa Gráfica (2014 / 2015)	49
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO CONCEITUAL.....	55
3	CONCEITOS DO MODELO VETORIAL ESFÉRICO – MVE - USADOS NO PROGRAMA APOLUX	56
3.1	CONCEITOS GERAIS DO MODELO VETORIAL ESFÉRICO – MVE.....	56
3.2	ESTÁGIO ATUAL DA VERSÃO PÚBLICA DO PROGRAMA APOLUX.....	61
3.2	ESTÁGIO ATUAL DA VERSÃO PÚBLICA DO PROGRAMA APOLUX.....	62
3.3.1	Avaliação Através do Mapeamento Digital de Luminâncias	62
3.3.2	Validação dos Procedimentos de Cálculos dos Fatores de Forma e Fluxos de Inter-Reflexão	64
3.3.3	Validação dos Procedimentos de Cálculos dos Modelos de Céu	67
3.3.4	Avaliação dos Protocolos do Relatório CIE 171 Relativos a Iluminação Artificial	69
3.3.5	Avaliações Indiretas da Disponibilidade Anual de Luz Natural Utilizando o Programa APOLUX	72
3.4	ESTRUTURA DOS DADOS DE VISIBILIDADE GERADOS NO APOLUX.....	75
4	PROPOSIÇÃO METODOLÓGICA PARA DETERMINAÇÃO DA ESTIMATIVA ANUAL DE LUZ NATURAL ATRAVÉS DA RADIOSIDADE	77
4.1	DETERMINAÇÃO DOS MODELOS DE CÉU E DE DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS A PARTIR DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS	78
4.2	OS DIFERENTES CONCEITOS DE COEFICIENTES: DLC, CR e RADIOSIDADE PLENA	85
4.2.1	O Método do DLC Clássico Associado às Direções Visualizadas da Abóbada ...	89

4.2.2	O Método do Coeficiente de Radiosidade – CR - Associado aos Vértices das Superfícies do Projeto.....	91
4.2.3	O Método da Radiosidade Plena Associado às Unidades de Horas / Datas da EALN.....	93
4.3	PROCESSAMENTO DA ESTIMATIVA ANUAL DE LUZ NATURAL – EALN – NOS DIFERENTES MÉTODOS.....	93
4.3.1	Determinação da EALN Através do DLC.....	94
4.3.2	Determinação da EALN Através do CR.....	95
4.3.3	Determinação da EALN através da Radiosidade Plena.....	95
4.4	PROPOSIÇÕES DE VERIFICAÇÃO.....	96
5	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MÉTODOS.....	97
5.1	VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DAS CONVERSÕES DE RADIAÇÃO EM ILUMINAÇÃO.....	97
5.2	VERIFICAÇÃO DO ALGORITMO DE INTERPRETAÇÃO DOS DADOS LUMINOSOS E SELEÇÃO DO TIPO DE CÉU.....	104
5.3	VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DO ENCADEAMENTO DE CÁLCULO NA DETERMINAÇÃO DA EALN ATRAVÉS DO DLC.....	110
5.4	VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA DE RESULTADOS DE CÁLCULOS DA EALN ATRAVÉS DOS TRÊS DIFERENTES CONCEITOS.....	113
5.4.1	Descrição dos Modelos Usados na Verificação.....	113
5.4.1.1	Ambiente Retangular Sem Protetores - Modelo TST0_0-1.....	113
5.4.1.2	Ambiente Retangular Com Protetores - Modelo TST1_0-1.....	114
5.4.1.3	Ambiente em L Com Protetores e Iluminação Zenital - Modelo TST2_0-1.....	115
5.4.1.4	Edifício Tribunal de Contas PR, com Múltiplos Ambientes e Elementos Exteriores – Modelo TC_1-0	116
5.4.2	Determinação das Resoluções de Visibilidade.....	118
5.4.3	Verificação da Determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN – nos Diferentes Métodos.....	121
5.4.4	Apresentação e Comentário dos Resultados da Verificação da EALN.....	124
5.4.4.1	Verificação dos Resultados Numéricos do Cálculo da EALN.....	124
5.4.4.2	Verificação dos Tempos de Processamento do Cálculo da EALN.....	136
6	CONCLUSÕES.....	141
6.1	SOBRE O MÉTODO DE SELEÇÃO DOS PADRÕES DE CÉU.....	141
6.1.1	Sobre a Consistência das Conversões de Radiação em Iluminação.....	142
6.1.2	Sobre o Algoritmo de Interpretação dos Dados Luminosos e Seleção do Tipo de Céu.....	143
6.1.3	Sobre a Consistência do Encadeamento de Cálculo na Determinação da EALN através do DLC.....	144
6.2	SOBRE AS ABORDAGENS DO COEFICIENTE DE RADIOSIDADE E DA RADIOSIDADE PLENA COMO ALTERNATIVAS AO MÉTODO CLÁSSICO DO DAYLIGHT COEFFICIENT – DLC.....	144
6.3	SOBRE A EFICIÊNCIA E VANTAGENS DE CADA UM DOS MÉTODOS.....	145
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
8	ANEXOS.....	154

1 – JUSTIFICATIVA

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.

No primeiro caso as simulações estáticas, que caracterizam um determinado momento, em um determinado local e sob determinadas condições de disponibilidade de luz, são eficientes e nos permitem visualizar diferentes condições de iluminação em um dado ambiente.

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 ao longo dele. Geralmente este estudo é feito com base anual, procurando determinadas a cada hora de cada dia de cada mês, como seria, provavelmente o céu que disponibiliza luz natural.

Falamos “provavelmente” porque este perfil de disponibilidade de luz ao longo do tempo, no modo mais avançado de análise, fundamenta-se em arquivos digitais que fornecem informações sob condições do ambiente e da abóbada celeste, geralmente caracterizando como um período típico de comportamento, como por exemplo um ano que tipifica o comportamento anual de um dado lugar. A principal característica destes arquivos é que são baseados em medições reais, pelo menos na grande maioria de seus componentes.

O método mais difundido de realização destas análises utiliza modelos computacionais conhecidos como Simulação Dinâmica Baseada no Clima. Estes estudos podem ser feitos com diferentes graus de resolução, que determinam o quanto o modelo de análise descreve com precisão o ambiente e a representação do céu em uma dada localidade: quanto maior a resolução do estudo maior a precisão alcançada, sendo necessário mais tempo de processamento para se obter o resultado da análise.

A questão do grau de resolução dos estudos passa a ser bastante relevante quando consideramos ambientes complexos, com muitos elementos geométricos, diversidade de materiais e detalhes em diferentes dimensões, que sejam significativos na caracterização do comportamento da luz nos ambientes.

Atualmente a grande maioria dos estudos utiliza ferramentas computacionais (sem as quais o estudo não seria possível) fundadas numa definição que se tornou clássica, conhecida como Daylight Coeficientes - DLC (traduzidos como Coeficientes de Luz Diurna). Estes DLCs permitem caracterizar um padrão de comportamento lumínico do ambiente, que pode ser alimentado por diferentes caracterizações de disponibilidade de luz do céu e do Sol, gerando respostas mais rápidas na determinação de cada situação específica ao longo do tempo, como será descrito adiante.

O problema é que este modelo de abordagem torna-se sucessivamente menos eficiente, na medida em que estudamos ambientes maiores, de maior complexidade geométrica e lumínica.

Some-se a isto a dificuldade de integração destas ferramentas de simulação particularmente ao trabalho dos projetistas de edifícios na realidade brasileira, o que serve de desestímulo ao desenvolvimento de tais estudos. (CHRISTAKOU, 2004).

As mais conhecidas e utilizadas abordagens computacionais fundadas no DLC utilizam o Método Ray-Tracing Recursivo (RTR) para seu cálculo, particularmente os que associam ao RTR a abordagem estatística conhecida como Monte Carlo (TREGENZA e WATERS, 1983; TREGENZA, 1983).

Os algoritmos que constituem a plataforma de comandos e funções RADIANCE¹, (WARD, 1994), baseada nos modelos RTR, constituem o cerne da grande maioria de programas que realizam simulações dinâmicas, destacando-se o DAYSIM², muito conhecido e utilizado, e o DIVA³, este um *plug in* similar ao DAYSIM, instalável no software de modelagem RHINOCEROS⁴.

¹ Amplamente Conhecido, disponível em: <http://radsite.lbl.gov/radiance/>

² Disponível em: <http://daysim.ning.com/>

³ Informações em : <http://diva4rhino.com/>

⁴ Informações em: <https://www.rhino3d.com/>

Por outro lado, não há praticamente registros de utilização do método da Radiosidade, inicialmente proposta por Cohen e Greenberg (1985) como alternativa ao Ray Tracing no estudo da iluminação, que abordem o conceito de disponibilidade anual de luz através da Simulação Dinâmica, que superem as dificuldades de processamento massivo.

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 performance mais avançada que à época da definição dos conceitos utilizados na simulação anualizada baseada em arquivos climáticos, vislumbramos a possibilidade de utilizar modelos alternativos ao DLC para realizar análises em séries temporais de ambientes complexos de também de forma eficiente, em dispêndio de tempo e até mesmo de precisão, e que apresentam algumas vantagens adicionais em relação ao que denominaremos DLC Clássico.

Atualmente, com o apoio da ELETROBRAS S.A. através do PROCEL – Programa de Conservação de Energia Elétrica o programa APOLUX⁵, desenvolvido no LabCon – ARQ / CTC / UFSC, vem sendo instrumentado com uma abordagem nova dos algoritmos da Radiosidade definidos no Modelo Vetorial Esférico, para propor um modelo alternativo de simulação baseada no clima usando arquivos digitais e que se fundamenta no método da Radiosidade.

Esta possibilidade parte do pressuposto de um conceito similar ao do DLC, de coeficientes de cálculo, mas associados ao ambiente em si e não à abóbada celeste. Esta nova abordagem permitirá, em tese, soluções mais eficientes e precisas do que o conceito de DLC aplicado à Radiosidade. Há ainda que se considerar a possibilidade de uma solução plena de Radiosidade (que detalharemos ao longo do trabalho) ser mais eficiente e precisa do que o conceito de coeficientes. Este é o ponto de partida para formularmos nossa Hipótese de trabalho.

1.1 HIPÓTESE DE TRABALHO

A hipótese de trabalho adotada é que, considerando-se a necessidade de estudos de ambientes complexos em geometria e caracterização de materiais, o Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade permite uma abordagem alternativa ao DLC, abordagem esta baseada num comportamento padrão de trocas luminosas entre as superfícies do ambiente que definiremos como Coeficientes de Radiosidade. Esta abordagem será mais eficiente e permitirá estudos de maior precisão em menos tempo, investigando-se ainda a possibilidade que, alternativamente, até mesmo a abordagem de Radiosidade Plena possa ser mais eficiente que ambos os coeficientes.

1.2 OBJETIVO GERAL

Propor um novo método de determinação de **Estimativa Anual de Luz Natural – EALN** para ambientes complexos, baseada em arquivos climáticos e calculada a partir de **Coefficientes de Radiosidade** ou de **Radiosidade Plena** alternativamente ao Daylight Coefficient - DLC, utilizando os Padrões de Céu da Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E 2003.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conceituar um método para seleção do Padrão de Céu mais adequado da norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E 2003 a partir de descritores extraídos de arquivos climáticos digitais.
- Conceituar as abordagens do Coeficiente de Radiosidade e da Radiosidade Plena como alternativas ao método do Daylight Coeficiente – DLC - clássico.
- Analisar comparativamente a eficiência de cada um dos métodos segundo diferentes graus de complexidade dos ambientes.

⁵ Versão disponível, sem as ferramentas propostas nesta tese: <http://foton.arq.ufsc.br/>

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em 8 capítulos, como segue:

1 – Justificativa, Hipótese e Objetivos do Trabalho: onde se apresenta a temática a ser abordada e a justificativa da abordagem, além dos objetivos geral e específicos.

2 – Revisão Bibliográfica: onde serão apresentados os principais conceitos, na literatura especializada, manipulados ao longo da pesquisa e que fundamentam o contexto teórico e prático das conceituações a serem propostas.

3 - Conceitos do Modelo Vetorial Esférico – MVE – Usados n programa Apolux: Aqui serão apresentadas as características do modelo conceitual onde se apoia a tese, assim como os procedimentos de validação dos algoritmos que servirão de base para a construção dos métodos a serem propostos.

4 – Conceituação Metodológica dos Novos Modelos de Abordagem: Seleção de Modelos de Céu, Coeficientes de Radiosidade e Radiosidade Plena. Aqui serão apresentados os novos conceitos, cerne da tese.

5 – Metodologia de Verificação dos Conceitos e Apresentação dos Resultados Obtidos: aqui serão apresentados os métodos utilizados para testar os novos conceitos metodológicos propostos, bem como serão apresentados e comentados os resultados obtidos.

6 – Conclusões: onde será feita a avaliação final da adequação da proposta frente aos resultados obtidos.

7 – Bibliografia: onde serão indicados os textos referenciados, assim como algumas indicações complementares.

8 – Anexos: onde constarão informações mais detalhadas de alguns aspectos apresentados mais sinteticamente no corpo da tese.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estudaremos os principais conceitos que fundamentam a simulação dinâmica e a elaboração da norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E (CIE, 2004), publicada em 2004, que estabelece o novo conjunto de 15 Padrões de Céu, segundo distribuição de luminâncias específicas de cada um. Pretende-se analisar exclusivamente os aspectos pertinentes ao tema da simulação dinâmica anual baseada em arquivos climáticos e os conceitos necessários à sua avaliação, assim como os principais aspectos que envolvem os procedimentos computacionais do Modelo Vetorial Esférico – MVE, utilizado no programa APOLUX, para desenvolver as novas abordagens propostas nesta tese. Serão estudados: a) Os modelos computacionais mais utilizados no estudo da iluminação global em arquitetura: Ray Tracing e Radiosidade; b) O conceito de Daylight Coefficients; c) Os fundamentos da Simulação Dinâmica Baseada em Arquivos Climáticos e o Modelo de Perez; d) A norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E que define os atuais modelos de céu caracterizados por padrões de distribuição de luminâncias; e) Principais trabalhos de referência para as questões centrais da tese relativas a processamentos; f) Os procedimentos computacionais do Modelo Vetorial Esférico – MVE, usado no programa APOLUX, que são aplicáveis aos métodos de simulação dinâmica apresentados nesta tese.

2.1 MODELOS FISICAMENTE CONSISTENTES DE ESTUDO DA ILUMINAÇÃO NATURAL: RAY-TRACING E RADIOSITY

A geração de modelos computacionais que são conhecidos como fisicamente consistentes iniciou-se com o Método Ray Tracing (aqui conhecido como Raio Traçado), ainda na década de 1970, seguindo-se do método Radiosity (aqui conhecido como Radiosidade) na década de 1980. Ambos foram inicialmente dedicados à geração de imagens em vídeo, sendo posteriormente aplicados, em conceitualização ampliada, no estudo físico da iluminação nas edificações, assim como em espaços abertos.

Neste tópico não pretendemos historiar os dois métodos citados, pois são métodos consagrados e suficientemente descritos. Iremos apenas destacar resumidamente os aspectos que influem mais diretamente na determinação da iluminação natural, particularmente na simulação anual dinâmica.

2.1.1 - Ray Tracing e Ray Tracing Recursivo

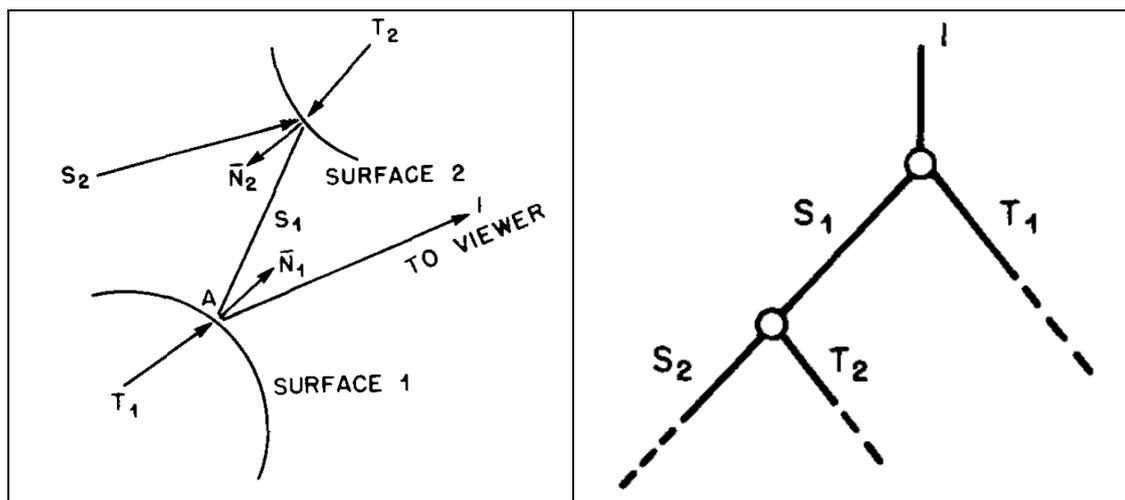
Como gênese do método Ray Tracing é considerado o artigo apresentado por Arthur Appel em 1968: *Some techniques for shading machine renderings of solids* (APPEL, 1968). O método, conhecido como Ray Casting, prevê o raio saindo de um ponto com uma determinada intensidade de luz atingindo o olho do observador, mapeando a tela de visualização.

Em 1980, Turner Whitted, do Bell Laboratories, em Holmdel, New Jersey, no artigo intitulado: “An Improved Illumination Model for Shaded Display” (WHITTED, 1980), utiliza o conceito de “informações globais” de iluminação para calcular a intensidade, assim como propõe um modelo de raios emitidos e “perseguidos” em sucessivas reflexões / transmissões / absorções até as fontes de luz que permite determinar as trocas luminosas.

O modelo constrói uma árvore esquemática que relaciona raios e variações de intensidades a partir de um dado ponto de vista.

Na Figura 1 temos o esquema original proposto pelo autor, e que serviu de base para todos os posteriores desenvolvimentos:

Figura 1: Esquema original do método Ray Tracing e do conceito de “árvore de raios”.



(Fonte: Whitted, 1980)

Este modelo ficou conhecido como Ray-Tracing Recursivo e foi posteriormente aprimorado por diferentes autores, sendo uma das mais significativas contribuições ao estudo fisicamente consistente da iluminação o trabalho de Tregenza (1983), onde o autor associa as técnicas estatísticas conhecidas como Método Monte Carlo⁶ ao método Ray Tracing, otimizando a concepção inicial. Abordagens matemáticas posteriores foram aplicadas, particularmente refinamentos progressivos, onde um elenco inicial mais reduzido de raios vai sendo progressivamente refinado emitindo-se outras gerações de raios entre aqueles que demonstram maior variação de intensidade.

Sinteticamente falando, o modelo foi consagrado mundialmente no trabalho de Greg J. Ward (1994): *The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System*. Neste trabalho foi apresentado o conjunto de ferramentas de programação (bibliotecas em C++) que incorporaram praticamente todos os conceitos associados ao Ray-Tracing até então, ferramentas que foram sendo implementadas com a contribuição de diferentes pesquisadores desde então.

O programa atualmente mais conhecido e usado que se vale dos engenhos de cálculo do Radiance, é o programa Daysim, cuja supervisão de desenvolvimento tem sido coordenada desde 1998 por Christoph F. Reinhart. O mesmo modelo do Daysim está atualmente incorporado como plug-in do modelador Rhinoceros 3D.

Alguns aspectos do conjunto Radiance / Daysim serão colocados adiante, mais detidamente discutindo a questão das simulações dinâmicas.

2.1.2 Radiosidade Plena e Refinamento Progressivo.

A utilização da radiosidade em estudos de iluminação foi herdada do estudo de trocas de energia por radiação eletromagnética. O marco inicial é considerado o trabalho de Cohen e Greenberg (1985): *The Hemi-Cube: A Radiosity Solution for Complex Environments*. Neste trabalho é proposto um algoritmo para resolver geometricamente de forma mais simplificada a

⁶ Designa-se por **Método de Monte Carlo** (MMC) (referenciado em: HASTINGS, 1970) qualquer método de uma classe de métodos estatísticos que se baseiam em amostragens aleatórias massivas para obter resultados numéricos, isto é, repetindo sucessivas simulações um elevado número de vezes, para calcular probabilidades heurísticamente, tal como se, de fato, se registassem os resultados reais em jogos de cassino (daí o nome).

integral dupla que caracteriza as trocas de energia entre diferentes parcelas de superfície em um ambiente, computacionalmente onerosa de ser resolvida analiticamente.

Na Figura 2 apresentamos o esquema conceitual original utilizado para descrever as trocas radiantes entre superfícies (a), o modelo geométrico que relaciona dois segmentos de área para quantificação das trocas de radiação entre elas, conhecido como Fator de Forma (b), assim como a equação de integral dupla⁷ que resolve analiticamente o cálculo do fator de forma total entre as duas superfícies (c):

Figura 2: Esquema conceitual e formulação matemática da equação da Radiosidade

<p style="text-align: center;">RADIOSITY RELATIONSHIPS</p>		$F_{A_i A_j} = \frac{1}{A_i} \iint_{A_i A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} dA_j dA_i$
(a) Trocas de radiação entre superfícies	(b) geometria dos Fatores de Forma	Integral dupla para determinação do Fator de Forma da Área J em relação à Área I

Fonte: Cohen e Greenberg, 1985

Os autores propõem então um modelo de projeções geométricas denominado Hemi-Cubo, que constitui um conjunto de pequenas unidades de áreas colocadas na face da metade de um cubo colocado sobre o ponto que se pretende analisar, conforme mostrado na Figura 3. O Fator de Forma destas unidades em relação ao ponto é pré-computado. Desta forma, pode-se projetar, para um ponto, as superfícies do ambiente sobre as unidades de área do hemi-cubo, fazendo-se então a somatória das unidades correspondentes à descrição de cada área.

Figura 3: Representação gráfica do Modelo do Hemi Cubo.

<p style="text-align: center;">THE HEMI-CUBE</p>	<p style="text-align: center;">TOP OF HEMI-CUBE</p>
(a) Esquema geral do conceito do Hemi-Cubo	(b) Modelo de cálculo do Fator de Forma de uma das unidades de área.

(Fonte: Cohen e Greenberg, 1985)

Esta nova abordagem possibilitou melhor manipulação dos cálculos das trocas entre superfícies difusoras, considerado o ponto frágil do modelo do Ray Tracing, mais adequado a meios especulares. Ressalte-se, por outro lado, a dificuldade em se lidar, através do Hemi-Cubo, das trocas luminosas em meios especulares, ponto forte do Ray Tracing.

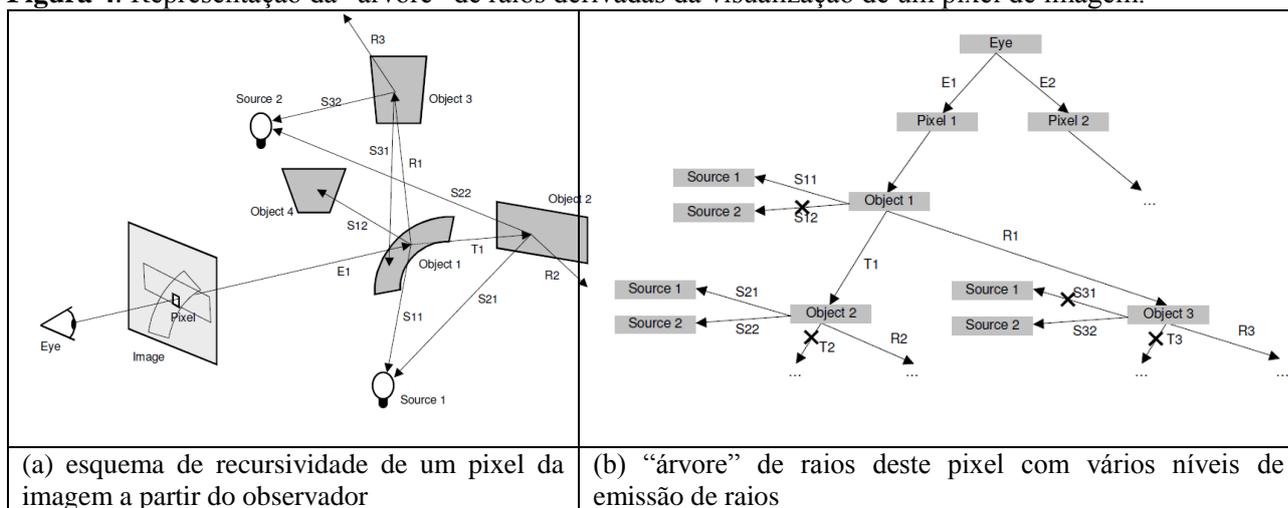
⁷ Não é objetivo nosso discutir a equação, que já é suficientemente conhecida no âmbito acadêmico deste trabalho.

Um desenvolvimento posterior, conhecido como Refinamento Progressivo (COHEN et ali, 1988)(SPENCER, 1993), propõe uma abordagem onde primeiro se determina, para a amostragem de pontos em superfícies do ambiente, os valores iniciais de iluminância, tomando-se em seguida as superfícies de maior iluminância para a aplicação da equação da radiosidade, e limitando a elas a determinação dos fatores de forma, assim procedendo-se a cada ciclo de aplicação da equação de radiosidade. Os autores caracterizam este modo de determinação dos fatores como sendo “*on the fly*”. Esta abordagem acelera a determinação do resultado final sem acréscimo significativo de erro, segundo os autores, mas tem o inconveniente de ter-se que determinar novamente os fatores de forma a cada nova situação de iluminação, mudadas as condições iniciais.

2.1.3 Principais Aspectos Comparativos Entre os Modelos

Os dois modelos aqui apresentados possuem vantagens e desvantagens, conforme bem descreve Geebelen (GEEBELEN, 2003-A). Os principais aspectos levantados com relação ao Ray Tracing são a dependência do ponto de vista do observador e a complexidade que a investigação de ambientes com muita variabilidade pode causar na construção da chamada “árvore de raios”. Na Figura 4 temos um exemplo mostrado pelo autor que favorece melhor entendimento do conceito de recursividade aplicado no Ray-Tracing, garantindo que todo raio investigado interessa à imagem. No entanto o método não é capaz de garantir que todo o ambiente, ou a maior parte dele seja descrita adequadamente, a não ser a custo de uma quantia muito significativa de raios.

Figura 4: Representação da “árvore” de raios derivadas da visualização de um pixel de imagem.



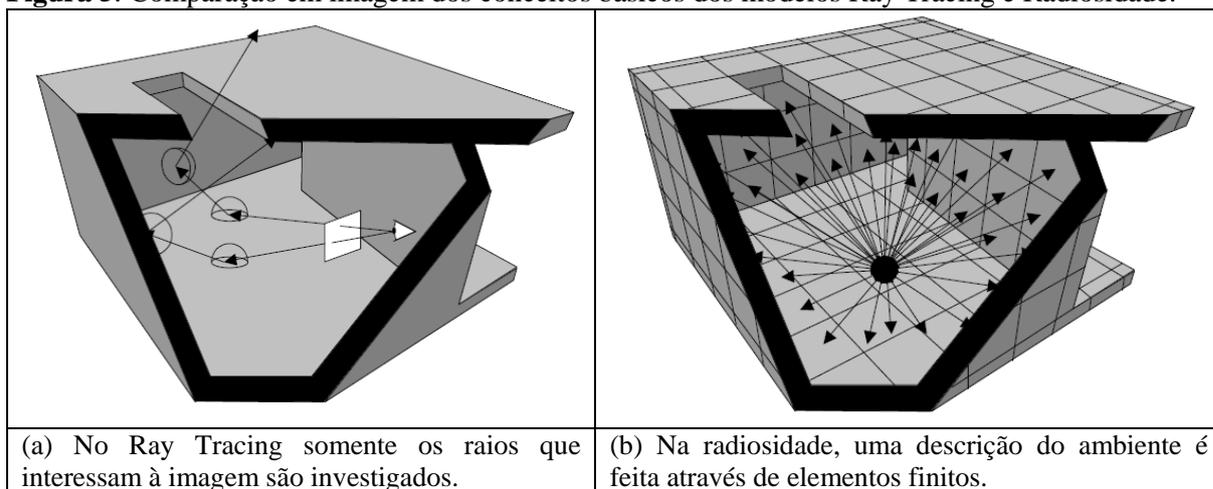
(Fonte: Geebelen, 2003-A)

Em princípio, a Radiosidade apresenta o mesmo problema, pois embora o modelo permita segmentar todo o ambiente, o fato de lidar com elementos finitos também introduz a possibilidade de a descrição do fluxo luminoso através do fator de forma 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, 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.

Na Figura 5 temos uma comparação mais ilustrativa entre os conceitos do Ray-Tracing Recursivo e da Radiosidade.

Figura 5: Comparação em imagem dos conceitos básicos dos modelos Ray Tracing e Radiosidade.



(Fonte: Geebelen, 2003-A)

O trabalho apresenta ainda um quadro comparativo entre os dois métodos, relacionando os diferentes aspectos, conforme mostrado na Tabela 1:

Tabela 1: Comparação entre algumas características dos métodos Ray Tracing e Radiosidade

Ray Tracing	Radiosidade
Dependente do Ponto de Vista	Independente do Ponto de Vista
Manipula melhor o comportamento especular	Manipula melhor o comportamento difuso
Manipula qualquer geometria	Manipula melhor geometrias facetadas
Pode manipular transparência	Funciona melhor com superfícies opacas
Não computa a completa distribuição de luz da cena	Computa a completa distribuição de luz da cena
Tem dificuldade com a iluminação indireta	A iluminação indireta é corretamente tratada

Fonte: Geebelen, 2003-A (traduzido do original)

Tratando mais detalhadamente destes dois métodos, destacamos os trabalhos de:

a) SZIRMAY-KALOS, L. (1996): **Theory of Three Dimensional Computer Graphics**. Expõe os fundamentos dos dois métodos, além de outros mais simplificados e que não nos interessam. Descreve com profundidade os erros analíticos e também indica as vantagens e desvantagens dos dois métodos.

b) BEKAERT, P. (1999) - **Hierarchical and Stochastic Algorithms for Radiosity**. Aborda a utilização de algoritmos de hierarquia de cálculo e métodos estocásticos no cálculo de iluminação através da radiosidade, analiticamente.

c) BOHN (2000) - **Radiosity on Evolving Networks**. O trabalho propõe a utilização de redes evolutivas (ou redes neurais) na determinação do processo de radiosidade, utilizando um método de determinação de células que “evoluem” à medida que estabelecem novas conexões com o ambiente. O modelo refere-se analiticamente à determinação da estrutura de hierarquia de divisão do ambiente para determinação dos fatores de forma. O foco é a determinação de imagens. Não foi encontrada nenhuma referência na pesquisa de aplicação prática deste modelo.

d) SZIRMAY-KALOS, L. (2000): **Monte Carlo Methods in Global Illumination**. Descreve a aplicação do Método Monte Carlo em algoritmos da Radiosidade, além de descrever o conceito e possibilidades de abordagem de algoritmos com componentes geométricos e analíticos.

e) GEEBELEN, NEUCKERMANS (2001) – **Natural Lighting Design in Architecture: Filling the Blanks**: Trabalho que descreve o estado da arte da iluminação natural em torno do ano 2000.

f) ANTAL, G. (2003): **Global Illumination Methods**. Tese que propõe uma abordagem de algoritmo complementar ao Ray Tracing (Parallel Ray-Bundle Interations)

g) GEEBELEN (2003-B): **Optimizing Daylight Simulations For Speed and Accuracy**. – Este trabalho também mostra comparações entre os dois métodos, mais aprofundado, tecendo

considerações sobre a necessidade de muito processamento para estudo da Luz Natural. Aponta o aumento de velocidade de processamento e da capacidade de memória como elemento favorável ao método da Radiosidade.

h) ATTILA, SZIRMAY-KALOS, GÁBOR (2005) - **Stochastic Glossy Global Illumination on the GPU**. Utiliza algoritmos da radiosidade programados em placa (GPU – Graphic Unit Processor) para uma abordagem em 2 passos: no primeiro determina-se o mapa de profundidades (semelhante a uma determinação de visibilidades) e num segundo momento utiliza a irradiação dos pontos para determinação das imagens.

i) OLIVEIRA FILHO, J. C. (2005) - **Estudo da Radiosidade com Aplicação de Métodos Estocásticos e Teste num Problema de Iluminação Pública**. Apresenta uma proposta de aplicação de simplificações estatísticas fundadas no Método Monte Carlos ao método da Radiosidade, com abordagem analítica, e não geométrica, visando minimização de processamento.

j) SZÉCSI, SZIRMAY-KALOS, SBERT (2008) - **Interactive Global Illumination with Precomputed Radiance Maps**. O trabalho aborda um método de computar previamente um “mapa de irradiações para determinados pontos do ambiente, que funcionariam como “fontes de luz” para o procedimento de determinação das iluminâncias do resto do ambiente.

2.2 A SIMULAÇÃO DINÂMICA BASEADA EM ARQUIVOS CLIMÁTICOS E O MODELO DE PEREZ

Os métodos de Simulação Dinâmica Baseada em Arquivos Climáticos iniciados a partir da década de 80 utilizavam dados de medições em estações meteorológicas que registravam principalmente dados de radiação solar direta, difusa, global, além de outras informações obtidas hora a hora (ou de 3 em 3 horas, em alguns casos) ao longo de todo um ano, mas não dados relativos a luminosidade da abóbada ou iluminâncias provocadas (direta, global e difusa). Diferentes tipos de arquivos climáticos eram utilizados em diferentes programas, com diferentes métodos de processamento de dados a partir dos dados do arquivo. No entanto os estudos relativos a iluminação são poucos e difíceis de realizar, face à ausência de dados de medição.

Não é nosso objetivo discorrer sobre os tipos de arquivos climáticos e suas diferenças. Citamos os principais tipos de arquivos utilizados então (CRAWLEY et ali, 1999):

a) Arquivos DOE, produzidos pelo Department of Energy, USA.

b) Arquivos TRY – Test Reference Year traduzido como Ano Climático de Referência.

c) Arquivos TMY - Test Meteorological Year.

Estes arquivos caracterizam “anos de referência”, não correspondendo exatamente a um ano medido seguidamente, mas a conjuntos de medições tratadas estatisticamente, e passaram por diferentes versões ao longo dos anos, inclusive incorporando dados de medição de grandezas luminosas, culminando em 1999 (CRAWLEY et ali, 1999) com a proposição do formato EPW (Energy Plus Weather Data), arquivo cuja estrutura incorpora o formato dos 3 principais outros tipos citados acima, além de outros menos utilizados. Este formato de arquivo está amplamente difundido atualmente e está fortemente associado ao programa EnergyPlus Energy Simulation Software, que é o programa mais conhecido e utilizado para avaliação do consumo energético de edificações, inclusive no Brasil⁸. O trabalho de CARLO (2005) apresenta sinteticamente as principais diferenças entre os diferentes tipos de arquivos climáticos e suas implicações no processamento de simulações para avaliação do desempenho energético de edificações.

Da perspectiva do estudo da iluminação através da simulação dinâmica com arquivos climáticos, o marco de referência principal foi o trabalho publicado por Perez et ali (1990), onde foi proposto um modelo matemático para obtenção dos dados de iluminação a partir dos dados de radiação solar medidos. Aliado ao conceito de Daylight Coeficients – DLC, proposto por Tregenza (1983), guiará os atuais estudos da disponibilidade anual de luz natural, particularmente.

⁸ O programa EnergyPlus Energy Simulation Software é disponibilizado no site do U.S. Department of Energy: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

Os arquivos climáticos estão disponíveis em vários sites, particularmente no do EnergyPlus⁹, que contém arquivos climáticos para o Brasil também. No caso do Brasil há também um amplo conjunto de arquivos disponibilizados pelo Laboratório de Eficiência Energética das Edificações – LABEEE / UFSC¹⁰.

Estes arquivos do LABEEE foram divulgados como revisados em novembro de 2012. Os critérios de revisão dos arquivos estão descritos pelo seu autor e revisor em RORIZ (2012 e 2012b). Os arquivos foram revisados “a partir de dados horários, registrados em 411 estações climatológicas do INMET entre os anos de 2000 e 2010. O trabalho foi iniciado em abril de 2010, como parte das atividades do grupo constituído no âmbito da ANTAC para estudar a revisão do Zoneamento Bioclimático do Brasil (NBR 15220-3, ABNT 2005).” (RORIZ, 2012, p.1)

Nos arquivos do LABEEE foram utilizadas, segundo este autor, as fórmulas desenvolvidas por Perez et ali (1990), para obtenção dos dados de Iluminação, mas não se detalha como exatamente foram aplicadas e a partir de quais indicadores. A identificação do ano climático de referência para cada localidade foi associada ao padrão TMY (Typical Meteorological Year).

No desenvolvimento de nosso trabalho foram utilizados arquivos para o Brasil de ambos os conjuntos, do site do EnergyPlus e do site do LABEEE. Foram utilizados ainda alguns arquivos de outras localidades não brasileiras, do site do EnergyPlus, nos procedimentos de verificação dos conceitos propostos nesta tese.

2.2.1 O Conceito de Daylight Coefficient - DLC

O conceito de **Daylight Coefficients** (que denominaremos **DLC**, ou mesmo **DLC Clássico**) foi inicialmente proposto por Tregenza e Waters (1983) com a finalidade de permitir uma avaliação de disponibilidade de luz natural em um ambiente ao longo do tempo visando principalmente, no início, o potencial de economia de energia consumida em iluminação artificial através da complementação com a 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-B).

Uma proposição mais simplificada de Fontoynt et al. (1993) utiliza o conceito de Directional Daylight Factor para estimar frequências de ocorrências de iluminâncias interiores em função de dados de radiação solar no exterior, numa abordagem semelhante a uma forma mais simplificada de DLC, mas da qual não se encontra consequência prática.

No cálculo do DLC, a consideração fundamental é que o fluxo luminoso oriundo de uma determinada parcela da abóbada celeste (ou de outra fonte, também) conduzido por um raio até um determinado ponto depende da intensidade do fluxo luminoso que deixa a parcela da abóbada na direção do raio e do conjunto de reflexões, transmissões e absorções pelas quais o raio passa até atingir o ponto, obtido através da aplicação do Método Ray Tracing. Considerando-se que o ambiente é uma constante (em termos de geometria e propriedades dos materiais) o raio estudado representa um coeficiente também constante que relaciona o fluxo que sai da parcela da abóbada com o fluxo que chega ao ponto do ambiente.

Desta forma pode-se considerar uma setorização do céu em regiões luminosas e estabelecer, para cada uma das regiões luminosas, o DLC relativo a cada um dos pontos do ambiente que se pretende estudar.

⁹ No site: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm

¹⁰ No site: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>

No modelo original do Método Monte Carlo aplicado ao cálculo de iluminação natural e à determinação dos DLCs, o céu é considerado como se fosse uma abóbada dividida em 145 regiões aproximadamente iguais, que podem ser definidas como ângulos sólidos emanados a partir do centro da esfera que contém o hemisfério superior caracterizado como abóbada.

Supondo-se um ambiente onde se pretende estudar um plano de análise que contenha N pontos, a determinação de uma dada situação de iluminação correspondente a uma distribuição da abóbada, que chamaremos doravante de **simulação estática**, é obtida emitindo-se um feixe de raios de cada ponto do ambiente e verificando quais são oriundo do céu, ou quais são considerados desprezíveis antes de se atingir o céu, considerando-se todas as 145 parcelas.

Na determinação dos DLCs, a situação considera que apenas uma das parcelas do céu emite uma quantidade de luz, e determina-se então para cada um dos N pontos o valor que chega desta parcela até o ponto, estabelecendo-se a relação entre o que sai do céu e o que chega ao ponto como o DLC. Assim, para cada ponto do plano, obtém-se um conjunto de 145 DLCs, correspondente a cada parcela do céu. A iluminância final de cada ponto é obtida definindo-se a distribuição de luminâncias da abóbada e fazendo-se a somatória dos produtos da luminância de cada parcela da abóbada pelo DLC do ponto correspondente àquela parcela. Genericamente podemos definir a Fórmula 1:

$$E_n = \sum_{i=1}^d \text{DLC}(\mathbf{n}, \mathbf{i}) * L_i \quad (1)$$

Onde

E_n é a iluminância final do ponto \mathbf{n} ;

\mathbf{n} é o índice do ponto \mathbf{n} ;

\mathbf{d} é o número de parcelas em que se divide a abóbada;

\mathbf{i} é o índice de uma parcela específica (variando de $\mathbf{1}$ a \mathbf{d});

$\text{DLC}(\mathbf{n}, \mathbf{i})$ é o Daylight Coefficient do ponto \mathbf{n} em relação à parcela \mathbf{i} ;

L_i é a luminância da parcela \mathbf{i}

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 se 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, em 145 cálculos estáticos, enquanto que utilizando-se diretamente o conjunto de horas anuais, teremos no mínimo 4.380 simulações estáticas. O custo computacional de aplicar os DLCs a cada ponto, conhecida cada distribuição de luminâncias das 4.380 abóbadas horárias, é um tempo que deve ser somado ao tempo de cálculo dos DLCs, mas é insignificante comparado ao tempo de cálculo dos DLCs ou ainda mais ao do cálculo pleno das 4.380 horas.

Uma das questões que se coloca na realização de simulações dinâmicas da iluminação natural é relacionada com as métricas utilizáveis na avaliação de resultados anualizados. Estas métricas referem-se a formas de interpretar resultados espaciais ao longo do tempo e estão descritas por vários textos (LUTRON, 2015), (REINHART et alii, 2006), (ENERGY DESIGN RESOURCES, 2008), (HESCHONG et alii, 2013), (WELLE, 2009)

Atualmente, as principais métricas utilizadas são:

a) Daylight Autonomy – DA: pode-se traduzir como Autonomia de Luz Natural (ou Diurna). Usa as iluminâncias em um plano de trabalho para determinar se há luz suficiente em um espaço de sorte que um ocupante possa realizar uma determinada tarefa apenas usando a luz natural disponível.

Exige níveis mínimos de iluminância para diferentes tipos de atividades e espaços como referência para sua determinação. Definida inicialmente em 1989, no seu formato mais atual é definida, mais relacionada a simulações, para um sensor específico como sendo “a porcentagem de tempo de ocupação em um ano na qual a iluminância mínima requerida em um sensor é provida pela luz natural apenas.” (REINHART et alii, 2006, p.16)

Neste formato, ela é estudada ao longo do ano dentro de um intervalo de tempo diário, por exemplo, entre 8 h e 18 h.

b) Continuous Daylight Autonomy – DAcon: tem a definição essencialmente igual ao DA, de avaliação percentual de meta ao longo do tempo, considerando também um limite mínimo de iluminância associada a um ponto, mas estabelece um conceito de “crédito parcial” relativo à proximidade da iluminância do ponto com a referência mínima. Por exemplo: se a meta é 500 lux e a avaliação atinge 400 lux, é atribuído um crédito de 0,8, relativo à razão 400 lux / 500 lux. Conceitualmente permite estabelecer uma faixa de variação na ponderação, p. ex entre 0.8 e 1.2, para atender a estudos que revelam a sensibilidade diferenciada das pessoas em relação à luz, e torna o limite de avaliação dos níveis um pouco mais “suavizado” quando comparado ao DA puro e simples. (REINHART et ali, 2006)

c) Useful Daylight Illuminances - UDI: pode-se traduzir como Iluminâncias Úteis de Luz Natural. Proposta por Mardaljevic e Nabil em 2005¹¹, também é baseada nas iluminâncias de um plano de trabalho e considera que uma iluminância compreendida entre um mínimo de 100 lux e um máximo de 2000 lux pode ser considerada “útil”, entendendo que valores menores que 100 lux provavelmente exigirão complemento de luz artificial, enquanto que iluminâncias maiores que 2.000 lux podem gerar desconforto por brilho excessivo e ganho de calor sem necessariamente acrescentar qualidade ao nível necessário de iluminação. É usada geralmente em conjunto com o DA, pois este identifica se a iluminância no sensor está acima do mínimo requerido, mas não informa se o nível é confortável ou excessivo, como no caso de luz direta do Sol.

Recentemente tem-se utilizado um patamar intermediário de 300 lux no intervalo de 100-2000 lux, para qualificar melhor o conceito, ponderando que UDI entre 100-300 lux poderão exigir complementação artificial em parte significativa do tempo, enquanto que UDI entre 300-2000 lux teriam menor possibilidade de exigir complementação artificial. (MARDALJEVIC, 2013)

Nesta métrica o sensor é avaliado em 3 situações percentuais: percentual abaixo da UDI, percentual contido na UDI (aqui, na abordagem moderna, dividido nos patamares 100-300 lux e 300-2.000 lux), e percentual acima da UDI.

Numa abordagem mais flexível, este conceito pode ser adotado mudando-se os limites inferior e superior para mais ou menos (ambos), conforme a conveniência das condições de iluminação necessárias.

d) Annual Light Exposure – ALE: pode-se traduzir como Exposição Anual à Luz. É um indicador de desempenho já estabelecido desde 2004 pela CIE - Commission Internationale de l’Eclairage como padrão para espaços projetados para conter obras de arte, como museus e galerias (REINHART et ali, 2006). É definido como a quantidade acumulada de luz visível incidente em um ponto de interesse ao longo de um ano, medido em **lux.horas** e está definido como um padrão pela Illuminating Engineering Society – IES desde 2013 (HESCHONG, L. et ali, 2013). É utilizado como um indicador em geral da quantidade total de luz incidente nos pontos, para diferentes tipos de análise além da degradação de materiais, como pigmentos sensíveis de pinturas, objetivo inicial do indicador. Ele geralmente é considerado ao longo de todo o período diário de 24 horas ao longo do ano, dado que relaciona-se não propriamente com os ocupantes e sim com os materiais sensíveis permanentemente localizados no ambiente. Isto não impede, entretanto, que seja estudado associado a intervalos de tempo quando voltado para outros objetivos. (REINHART et ali, 2006).

A notação utilizada é: (ASE1000,250): 1.000 lux/250 horas indicando a porcentagem de horas de trabalho durante o qual o nível de luz direta do Sol exclusivamente excede o limite de 1.000 lux por 250 h, o que corresponderia a uma quantidade acumulada de 1.000 lux * 250 h = 250.000 lux.h.

¹¹ Nabil A, Mardaljevic J. 2005. Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings. *Lighting Res Tech.* 37(1):41–59. – Apud REINHART et ali (2006).

Para entender melhor o conceito pode-se ver as indicações feita pelo U.S. National Archives, National Park Service, U.S.A. (U.S. NATIONAL ARCHIVES , 2015) quanto à recomendação de exposição ao Sol de obras de arte de seu acervo, relacionando limite de ALE, opções de iluminação e organização horária, considerando um período de exibição do acervo::

d.1) Materiais Muito Sensíveis à Luz: Menos que 50.000 lux.h por exibição, correspondendo, em períodos diários de 10 horas, a 90 dias de exposição sob 50 lux de iluminação (ALE50lux,900h), ou então 45 dias sob 100 lux (ALE100lux,450h), modulando-se a exposição em 45.000 lux.h.

d.2) Materiais Moderadamente Sensíveis à Luz: Menos que 200.000 lux.h por exibição, correspondendo, em períodos diários de 10 horas, a 365 dias de exposição sob 50 lux de iluminação (ALE50lux,3650h), ou então 182 dias sob 100 lux (ALE100lux,1820h), modulando-se a exposição em aproximadamente 182.500 lux.h.

e) **Spatial Daylight Autonomy – sDA**: pode-se traduzir como Autonomia Espacial da Luz Natural (ou Diurna). Este indicador avalia uma situação superficial, congregando o conjunto de pontos (ou sensores) de um plano de trabalho com relação ao DA específico de cada ponto (LUTRON, 2015). É definido como a porcentagem de área de um ambiente em que um nível mínimo de iluminância pode ser completamente provido por luz natural durante pelo menos 50% das horas de trabalho. Tem uma notação que indica a meta e a condição, por exemplo: para uma meta de 330 lux, temos **sDA300,50%** como notação padronizada. Este indicador, também foi definido como padrão pela Illuminating Engineering Society – IES desde 2013 (HESCHONG, L. et ali, 2013).

No trabalho de Heschong, Saxena e Higa (2010) é feita uma revisão das métricas e apresentada uma visão sintética e abrangente do estudo da luz natural, propondo-se uma Estrutura de Análise da Luz Natural, apresentada na Figura 6:

Figura 6: Estrutura de Análise da Luz Natural

1	2	A	B	C	D	E	F
Human Comfort	Energy Impacts	Space Description	Fenestration Description	Climate Inputs	Exterior Context	Occupant Behavior	Building Energy Systems
Illuminance Sufficiency Uniformity Gradients Spatial plots	Lighting energy Full load equiv Annual kWh Peak kW Load profiles	Geometry boxes complex orthogonal furniture overhangs, fins mullions, rods angles curves	Windows size & location Tvis diffuse glazing framing effects angular dependence variable TVIS optically complex glazing dynamic BSDF	Sun altitude azimuth hourly intensity terrain adjustments	Ground diffuse reflectance slope multiple conditions specular reflectance seasonal variation weather variation	Task task type furniture layouts task location view direction	Lighting installed KHz control zones perfect dimming complex switching control logic multiple systems fixture type and layout
Luminance Contrast ratios Uniformity Glare Gradients 3D imaging View quality	Cooling Additional load Annual kWh Peak kW Load profiles	Orientation cardinal precise latitude longitude	Skylights size & location TVIS framing and well effects glazing geometry photometrics variable TVIS dynamic BSDF	Sky uniform distribution hourly intensity Perez distribution partly cloudy fog/haze precipitation	Buildings horizon shape opaque boxes diffuse reflectance specular reflectance complex shapes transparency	Blinds operation solar trigger response time glare trigger angle setting auto override privacy, security maintenance	Heating annual load dynamic response system efficiency
Thermal Radiant	Heating Additional load Annual kWh Peak kW Load profiles	Visual Properties diffuse reflectance specular reflectance internal transparency	Int. blinds, shades Tvis direct v diffuse operating schedule multiple triggers angle, shape dynamic BSDF	Thermal CDD/HDD hourly temps relative humidity radiant component wind speed microclimate	Vegetation shape & location reflectance transparency seasonal variation	Lighting Choices control logic task light control auto override maintenance	Cooling annual load dynamic response system efficiency
Circadian Timing Duration Intensity Spectrum Relative context	Ventilation Additional load Annual kWh Peak kW Load profiles	Thermal Properties U-value SHGC capacitance blinds interactions	Ext.blinds, awnings Tvis direct v diffuse angle, shape operating schedule	Other view quality cars water	Occupant schedules occupancy type hourly schedules comfort needs window operation bldg management style Demographics age health circadian sensitivity circadian status	Ventilation annual load dynamic response variable windows	

Fonte: Heschong, Saxena e Higa (2010).

Recentemente há autores defendendo uma simplificação analítica, utilizando o Daylight Factor – DLF clássico como método para determinação de performances temporalizadas da luz natural. Citamos como exemplo atual os trabalhos de Iversen et al. (2013) que investiga a

capacidade de calcular o DLF de nove dos programas de simulação mais conhecidos, assim como Iversen (2013) que propõe um estrutura simples para avaliar condições de iluminação natural em edifícios urbanos nos estágios iniciais de projeto, propondo o uso do DLF.

2.2.2 Fundamentos Conceituais e Bases Empíricas do Modelo de Perez.

O Modelo de Perez (PEREZ et ali,1990) consiste, basicamente de um conjunto de fórmulas denominadas de Fórmulas de Eficiência Luminosa, que foram deduzidas por análise regressiva matemática a partir dos dados de iluminação empíricos medidos em 10 estações de medição norte-americanas e 3 europeias (2 na França e uma na Suíça) estudados durante 3 anos, posteriormente acrescentando-se dados de estações do Japão e Inglaterra (PEREZ et ali., 1992) (INEICHEN et ali., 1994).

A análise regressiva envolve diferentes parâmetros, como altura solar, grau de umidade no ar, Irradiação Difusa e Global, entre outros, que permitem criar 8 categorias de claridade (definida no estudo, como mostraremos adiante). A cada categoria estão associados parâmetros discretos que são inseridos num conjunto de fórmulas que resultarão principalmente, para uma data/hora estudada:

- a) no valor da Iluminância Horizontal Global;
- b) no valor da Iluminância Horizontal Difusa;
- c) no valor da Iluminância Solar Direta Normal à direção do Sol;
- d) no valor da Luminância do Zenith;

Posteriormente estes dados e as fórmulas de conversão foram incrementados com um modelo de distribuição de luminâncias na abóbada celeste relativas a uma dada luminância do Zenith (Perez et ali, 1992). Neste modelo, a cada uma das categorias de claridade, correspondendo às respectivas grandezas luminosas obtidas - iluminâncias horizontais global e difusa, normal direta solar e luminância do Zenith – está associada uma formulação de distribuição de luminâncias pela abóbada celeste, dada em termos de uma razão L_z / L_d entre a luminância do Zenith e a luminância em uma dada direção d da abóbada.

Este método de distribuição das luminâncias a partir da luminância do Zenith será a base do trabalho posterior de Kittler et ali (1997), onde um novo conjunto de modelos de céu é proposto através de abordagem similar ampliada, gerando 15 modelos de céu. Deste trabalho resultará posteriormente a Norma **ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E** (CIE, 2004), que define os atuais modelos de céu caracterizados por padrões de distribuição de luminâncias.

2.2.3 Formulação Matemática do Modelo de Perez.

O método de determinação de parâmetros para a definição da distribuição de luminâncias desenvolvido a partir do trabalho de Perez et ali (1990), parte da definição 8 categorias de céu associadas a 8 categorias de brilho, obtidas a partir da interpretação de dados climáticos de radiação, temperatura e umidade. Também a partir de dados de radiação são definidas funções para determinação de dados de iluminação que serão geradores da distribuição de luminâncias para cada categoria dos oito tipos de céu.

O modelo utiliza 4 parâmetros para definir grandezas luminosas que serão utilizadas para determinação, entre outras coisas, da distribuição de luminâncias dentro de cada categoria de modelo.

Os parâmetros são:

- a) **O ângulo solar com o Zenit**, anotado como Z , em radianos.
- b) **A claridade do céu**, anotada como ϵ , dada pela Fórmula 2:

$$\epsilon = [(Dh + I)/Dh + kZ^3]/[1 + kZ^3] \quad (2)$$

Onde:

Dh é a irradiação difusa horizontal;

I a irradiação direta de incidência normal;

Z é o ângulo solar com o Zenith, em radianos;

k é uma constante, igual a 1,041 para Z em radianos;

A formulação Z^3 foi adicionada pelos autores à expressão original, sendo uma expressão simplificada para eliminar a dependência entre esse componente e o ângulo solar com o Zenit.

c) **O brilho (delta) do céu**, anotado como Δ e dado pela Fórmula 3:

$$\Delta = Dh * m/I_o \quad (3)$$

Onde:

Dh é a Irradiação Difusa Horizontal;

m é a Massa de Ar Ótica Relativa;

I_o a Irradiação Normal Extraterrestre;

d) **O conteúdo de água precipitável na atmosfera**, anotado como W , dado pela Fórmula 4:

$$W = \exp(0.07 * Td - 0.075) \quad (4)$$

Onde:

Td ($^{\circ}C$) é a temperatura superficial do ponto de orvalho (medida a cada 3 horas).

Estes parâmetros são usados para a modelagem das diferentes grandezas luminosas, nos denominados “modelos de eficácia luminosa”, numa formulação genérica dada na Fórmula 5:

$$Y = X * F \quad (5)$$

Esta fórmula expressa uma relação “*condição de insolação X (receptor e geometria solar)*”, onde:

Y é a quantidade modelada (ex., luminância do Zenith);

X é a quantidade dependente apenas dos insumos básicos especificados acima (ex. irradiação difusa);

F é a função de transferência dependente dos componentes da condição de insolação e da geometria solar.

A função F combina uma formulação analítica para as variáveis Δ , Z e W , e uma formulação discreta para a variável ϵ .

Na maioria das vezes, a relação de F com as condições de insolação será expressa como na Fórmula 6:

$$F(\epsilon, \Delta, Z, W) = a_i(\epsilon) + b_i(\epsilon)f(W) + c_i(\epsilon)g(Z) + d_i(\epsilon)h(\Delta) \quad (6)$$

Onde:

f , g e h são funções analíticas;

a_i , b_i , c_i e d_i são funções discretas representadas em 4 matrizes associadas a oito categorias de brilho ϵ .

Cada uma das 4 matrizes representa os parâmetros para cada uma das funções de conversão. As oito categorias de brilho que caracterizam oito tipos de céu, de completamente nublado ao totalmente limpo, são dadas na Tabela 2 pelos seguintes intervalos de variação:

Tabela 2: Categorias de brilho do céu ϵ

Categoria ϵ	Limite inferior	Limite superior
1. Nublado	1	1.065
2.	1.065	1.230
3.	1.230	1.500
4.	1.500	1.950
5.	1.950	2.800
6.	2.800	4.500
7.	4.500	6.200
8. Limpo	6.200	--

Fonte: Perez et ali (1990)(tradução do autor)

A partir desta elaboração, são apresentadas 3 fórmulas de conversão luminosa de Radiação Global (Fórmula 7), Difusa (Fórmula 8) e Direta Normal (Fórmula 9), além de uma quarta fórmula de Predição da Luminância do Zenith (Fórmula 10), como segue:

a) Conversão de Radiação Global Horizontal para Iluminância Global Horizontal:

$$gh = Gh * [a_i + b_i * W + c_i * \cos(Z) + d_i * Ln(\Delta)] \quad (7)$$

Onde:

gh : Iluminância Global Horizontal;

Gh : Radiação Global Horizontal;

W : conteúdo de água precipitável na atmosfera;

Z : ângulo zenital do Sol;

$Ln(\Delta)$: logaritmo neperiano de Delta;

Δ : Brilho Delta;

b) Conversão de Radiação Difusa Horizontal para Iluminância Difusa Horizontal:

$$dh = Dh * [a_i + b_i * W + c_i * \cos(Z) + d_i * Ln(\Delta)] \quad (8)$$

Onde:

dh : Iluminância Difusa Horizontal;

Dh : Radiação Difusa Horizontal;

W : conteúdo de água precipitável na atmosfera;

Z : ângulo zenital do Sol;

$Ln(\Delta)$: logaritmo neperiano de Delta;

Δ : Brilho Delta;

c) Conversão de Radiação Direta Normal para Iluminância Direta Normal:

$$in = \max\{0, In[a_i + b_i * W + c_i * \exp(5.73 * Z - 5) + d_1 * \Delta]\} \quad (9)$$

Onde:

in : Iluminância Direta Normal do Sol;

Gh : Radiação Direta Normal do Sol;

W : conteúdo de água precipitável na atmosfera;

$\exp('num')$: função exponencial correspondente a e^{num}

Z : ângulo zenital do Sol;

Δ : Brilho Delta;

d) Modelo de Predição da Luminância do Zenith:

$$Lvz = Dh * [a_i + c_i * \cos Z + c'_i * \exp(-3 * Z) + d_i * \Delta] \quad (10)$$

Onde:

Lvz : Luminância do Zenith;

Dh : Radiação Difusa Horizontal;

Z : ângulo zenital do Sol;

Δ : Brilho Delta;

Os coeficientes discretos para *a_i*, *b_i*, *c_i* e *d_i* utilizados nas 4 formulações são dados na Tabela 3 para cada uma das 8 categorias de claridade:

Tabela 3: Coeficientes discretos *a_i*, *b_i*, *c_i* e *d_i*.

ϵ	Eficiência Luminosa Global Fórmula (7)				Eficiência Luminosa Direta Fórmula (9)			
	<i>a_i</i>	<i>b_i</i>	<i>c_i</i>	<i>d_i</i>	<i>a_i</i>	<i>b_i</i>	<i>c_i</i>	<i>d_i</i>
1	96.63	- 0.47	11.50	- 9.16	57.20	- 4.55	- 2.98	117.12
2	107.54	0.79	1.79	- 1.19	98.99	- 3.46	- 1.21	12.38
3	98.73	0.70	4.40	- 6.95	109.83	- 4.90	- 1.71	- 8.81
4	92.72	0.56	8.36	- 8.31	110.34	- 5.84	- 1.99	- 4.56
5	86.73	0.98	7.10	- 10.94	106.36	- 3.97	- 1.75	- 6.16
6	88.34	1.39	6.06	- 7.60	107.19	- 1.25	- 1.51	- 26.73
7	78.63	1.47	4.93	- 11.37	105.75	0.77	- 1.26	- 34.44
8	99.65	1.86	- 4.46	- 3.15	101.18	1.58	- 1.10	- 8.29
ϵ	Eficiência Luminosa Difusa Fórmula (8)				Previsão da Luminância do Zenit Fórmula (10)			
	<i>a_i</i>	<i>b_i</i>	<i>c_i</i>	<i>d_i</i>	<i>a_i</i>	<i>c_i</i>	<i>c'_i</i>	<i>d_i</i>
1	97.24	- 0.46	12.00	- 8.91	40.86	26.77	- 29.59	- 45.75
2	107.22	1.15	0.59	- 3.95	26.58	14.73	58.46	- 21.25
3	104.97	2.96	- 5.53	- 8.77	19.34	2.28	100.00	0.25
4	102.39	5.59	- 13.95	- 13.90	13.25	- 1.39	124.79	15.66
5	100.71	5.94	- 22.75	- 23.74	14.47	- 5.09	160.09	9.13
6	106.42	3.83	- 36.15	- 28.83	19.76	- 3.88	154.61	- 19.21
7	141.88	1.90	- 53.24	- 14.03	28.39	- 9.67	151.58	- 69.39
8	152.23	0.35	- 45.27	- 7.98	42.91	- 19.62	130.80	- 164.08

Fonte: Perez et ali. (1990) (tradução do autor)

Os autores observam no trabalho que os dados que serviram às regressões que geraram as fórmulas representam alturas solares até cerca de 80 graus (ou ângulos Z maiores que 10 graus). Particularmente no modelo de Predição da Luminância do Zenith, para o qual não há dados de medições, este aspecto interfere bastante, sendo por isto que este modelo é chamado de Predição e não de Conversão, como as 3 outras grandezas modeladas.

2.2.4 O Método de Distribuição de Luminâncias do Modelo de Perez

O método de distribuição de luminâncias para 8 categorias de céu foi posteriormente definida (PEREZ et ali, 1993, PEREZ et ali, 1993:Errata) a partir de uma formulação que estabelece para uma determinada parcela do céu uma luminância relativa à Luminância do Zenit, de acordo com as mesmas categorias de claridade propostas para os modelos de conversão luminosa (PEREZ, 1990)

A formulação geral é dada pela Fórmula 11:

$$lv = f(\zeta, \gamma) = \left[1 + a * \exp\left(\frac{b}{\cos(\zeta)}\right) \right] * [1 + c * \exp(d * \gamma) + e * \cos^2(\gamma)] \quad (11)$$

Onde:

ζ : é o ângulo zenital do elemento considerado.

γ : É o ângulo entre este elemento e a posição do Sol.

Os coeficientes a , b , c , d e e são definidos a partir das categorias de claridade do céu conforme o coeficiente ϵ indicado na Fórmula (2) e são funções da categoria de brilho Δ .

Observa-se neste trabalho, entretanto, que o brilho Δ não tem a mesma nomenclatura, embora com a mesma formulação que a dada em Perez et al (1990) (segundo a Fórmula 3), sendo dado pela Fórmula 12:

$$\Delta = I * m / I_o \quad (12)$$

Onde:

I : é a Irradiação Direta Normal;

m : é a Massa de Ar Ótica Relativa;

I_o : a Irradiação Normal Extraterrestre;

Em errata ao artigo de 1993, acrescenta a condição adicional para a determinação do brilho Δ , dada pela Fórmula 13:

$$Se (1.065 < \epsilon < 2.8) \text{ então } \Delta = \max(0.2, \Delta) \quad (13)$$

Os coeficientes a , b , c , d e e são dados pela mesma Fórmula 14, trocando-se os coeficientes (há duas exceções na primeira linha para c e d):

$$a = a_1(\epsilon) + a_2(\epsilon) * Z + \Delta * [a_3(\epsilon) + a_4(\epsilon) * Z] \quad (14)$$

Onde: a_1 , a_2 , a_3 e a_4 (ou b , c , d , e) são obtidos a partir da Tabela 4 segundo a categoria de ϵ .

Tabela 4: Coeficientes intermediários para determinação dos coeficientes de modelagem, por categoria de claridade ϵ .

For sky clearness ranging									
From	To	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4
1.000	1.065	1.3525	-0.2576	-0.2690	-1.4366	-0.7670	0.0007	1.2734	-0.1233
1.065	1.230	-1.2219	-0.7730	1.4148	1.1016	-0.2054	0.0367	-3.9128	0.9156
1.230	1.500	-1.1000	-0.2515	0.8952	0.0156	0.2782	-0.1812	-4.5000	1.1766
1.500	1.950	-0.5484	-0.6654	-0.2672	0.7117	0.7234	-0.6219	-5.6812	2.6297
1.950	2.800	-0.6000	-0.3566	-2.5000	2.3250	0.2937	0.0496	-5.6812	1.8415
2.800	4.500	-1.0156	-0.3670	1.0078	1.4051	0.2875	-0.5328	-3.8500	3.3750
4.500	6.200	-1.0000	0.0211	0.5025	-0.5119	-0.3000	0.1922	0.7023	-1.6317
6.200	—	-1.0500	0.0289	0.4260	0.3590	-0.3250	0.1156	0.7781	0.0025
		c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4
1.000	1.065	2.8000	0.6004	1.2375	1.0000*	1.8734	0.6297	0.9738	0.2809*
1.065	1.230	6.9750	0.1774	6.4477	-0.1239	-1.5798	-0.5081	-1.7812	0.1080
1.230	1.500	24.7219	-13.0812	-37.7000	34.8438	-5.0000	1.5218	3.9229	-2.6204
1.500	1.950	33.3389	-18.3000	-62.2500	52.0781	-3.5000	0.0016	1.1477	0.1062
1.950	2.800	21.0000	-4.7656	-21.5906	7.2492	-3.5000	-0.1554	1.4062	0.3988
2.800	4.500	14.0000	-0.9999	-7.1406	7.5469	-3.4000	-0.1078	-1.0750	1.5702
4.500	6.200	19.0000	-5.0000	1.2438	-1.9094	-4.0000	0.0250	0.3844	0.2656
6.200	—	31.0625	-14.5000	-46.1148	55.3750	-7.2312	0.4050	13.3500	0.6234
		e1	e2	e3	e4				
1.000	1.065	0.0356	-0.1246	-0.5718	0.9938				
1.065	1.230	0.2624	0.0672	-0.2190	-0.4285				
1.230	1.500	-0.0156	0.1597	0.4199	-0.5562				
1.500	1.950	0.4659	-0.3296	-0.0876	-0.0329				
1.950	2.800	0.0032	0.0766	-0.0656	-0.1294				
2.800	4.500	-0.0672	0.4016	0.3017	-0.4844				
4.500	6.200	1.0468	-0.3788	-2.4517	1.4656				
6.200	—	1.5000	-0.6426	1.8564	0.5636				

Fonte: Perez et ali (1993)

As duas exceções indicadas acima são para os coeficientes **c** e **d** no primeiro intervalo de ϵ , dados segundo as Fórmulas 15 e 16:

$$c = \exp[(\Delta * (c_1 + c_2 * Z))^{c_3}] - c_4 \quad (15)$$

$$d = -\exp[\Delta * (d_1 + d_2 * Z)] + d_3 + \Delta * d_4 \quad (16)$$

2.2.5 Os Novos Padrões de Céu da Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E

No trabalho de Kittler, Perez e Darula (1997) são apresentados 15 modelos de céu derivados da mesma concepção de Perez (1993), mas com formulações um pouco diferentes na determinação dos parâmetros das fórmulas. São propostos os conceitos de:

a) **Graduação** (“*gradation*”): Indica a distribuição da claridade ao longo da altura angular em um determinado plano, dado pela Fórmula 17:

$$\frac{\varphi(Z)}{\varphi(0^\circ)} = \frac{1 + a * \exp(b/\cos Z)}{1 + a * \exp(b)} \quad (17)$$

Onde:

Z : é o ângulo solar com o Zenith, em graus;

a, b : são os coeficientes associados aos diferentes tipos de céu.

b) **Indicatriz** (“*indicatrix*”): que indica uma variação da função da graduação ao longo de um giro horizontal do plano que contém a função de graduação, de sorte que a cada plano vertical, a graduação é mediada pela indicatriz, que é dada pela Fórmula 18:

$$f(\chi) = 1 + c * [\exp(d * \chi) - \exp(d * \pi/2)] + e * \cos^2 \chi \quad (18)$$

Onde:

χ : é o ângulo entre a posição do Sol e uma posição específica qualquer da abóbada;

c, d, e : são coeficientes associados aos diferentes tipos de céu

São definidas 6 categorias de indicatriz e 6 de graduação, sendo que ambas as funções são combinadas para gerar então um novo conjunto de padrões de céu, dados genericamente pela Fórmula 19:

$$\frac{L}{Lz} = \frac{f(\chi) * \varphi(Z)}{f(Zs) * \varphi(0^\circ)} \quad (19)$$

Onde:

L : é a luminância de uma posição específica do céu;

Lz : é a luminância do Zenith;

χ : é o ângulo entre a posição específica e o Sol;

Z : é o ângulo entre a posição específica e o Zenith;

Zs : é o ângulo entre a posição do Sol e o Zenith;

O novo conjunto, no entanto, não é uma matriz de 36 combinações de funções, sendo reduzido a um conjunto de 15 padrões, considerando que algumas combinações apresentaram muita similaridade, segundo os autores.

O conjunto de 15 padrões, com os respectivos coeficientes discretos e a descrição das características de cada tipo de céu estão definidos nas Tabelas 5(a) e 5(b):

Tabela 5 (a): Padrões de céu gerados pela combinação de Graduação (em número romano). Indicatrtriz (número arábico). Céus de 1 a 7.

SSLD Code	Type of sky	Standard gradation parameters	Standard indicatrix parameters	Frequent range Dv/Ev	Usual range Δ	Tv range	Gradation Standard : Range:zenith: horizon	Indicatrix prolongation $f(0^\circ)/f(90^\circ)$ Standard : Range :	Lz/Dv range *)	Comments
I.1	Overcast with the steep gradation and azimuthally uniform	a=4 b= -0.7	1 : c=0 d= -1 e= 0	0.02-0.25 seldom 0.25-0.4	<0.18 **)	over 40 over 20	1:0.33 1:0.1 - 1:0.5	1:1 0.8:1 - 1.2:1	about 0.38	Including the current CIE Standard
I.2	Overcast with a steep gradation and slight brightening toward sun	a=4 b= -0.7	2 : c= 2 d= -1.5 e= 0.15	0.2 - 0.4 seldom >0.4	0.18-0.3	over 15	1:0.33 1:0.1 - 1:0.5	3:1 1.2:1 - 3.5:1	about 0.35	No direct sunlight sometimes darker or brighter skies
II.1	Overcast moderately gradated, azimuthally uniform	I : a= 1.1 b= -0.8	1 : c=0 d= -1 e= 0	0.2 - 0.4 usually brighter	0.12-0.3	usually around 20	1:0.66 1:0.5 - 1:0.85	1:1 0.8:1 - 1.2:1	0.33-0.38	No direct sunlight sometimes darker or brighter skies
II.2	Overcast moderately gradated and slightly brightening toward sun	I : a= 1.1 b= -0.8	2 : c= 2 d= -1.5 e= 0.15	0.3 - 0.6 usually brighter	0.25-0.5	usually around 20	1:0.66 1:0.5 - 1:0.85	3:1 1.2:1 - 3.5:1	0.32-0.35	No direct sunlight exceptionally darker skies
III.1	Overcast overall uniform	II : a=0 b= -1	1 : c=0 d= -1 e= 0	around 0.35	0.2-0.3	usually around 20	1:1 1:0.85-1:1.35	1:1 0.8:1 - 1.2:1	0.30-0.33	No direct sunlight sometimes darker or brighter skies
III.2	Cloudy or quasiovercast with a uniform gradation and slight brightening toward sun	II : a=0 b= -1	2 : c= 2 d= -1.5 e= 0.15	usually over 0.3	0.25-0.5	usually around 15	1:1 1:0.85-1:1.35	3:1 1.2:1 - 3.5:1	0.27-0.32	No direct sunlight exceptionally darker skies
III.3	Cloudy or quasiovercast with a brighter circumsolar effect and uniform gradation	II : a=0 b= -1	3 : c= 5 d= -2.5 e= 0.3	usually 0.40 - 0.6	>0.35	usually around 10	1:1 1:0.85-1:1.35	6:1 3.5:1 - 7:1	0.25-0.30	Filtered direct sunlight exceptionally darker skies

Note *) For nonovercast types the Lz/Dv range is valid only if Zs is over 60 degrees

**) Exceptional are brighter cases >0.18

Fonte: Kittler, Perez e Darula (1997)

Tabela 5 (b): Padrões de céu gerados pela combinação de Graduação (em número romano). Indicatrtriz (número arábico). Céus de 8 a 15.

SSLD Code	Type of sky	Standard gradation parameters	Standard indicatrix parameters	Frequent range Dv/Ev	Usual range Δ	Tv range	Gradation Standard : Range:zenith: horizon	Indicatrix prolongation $f(0^\circ)/f(90^\circ)$ Standard : Range :	Lz/Dv range *)	Comments
III.4	Cloudy rather uniform with a clear solar corona	II : a=0 b= -1	4 : c=10 d= -3 e= 0.45	usually over 0.3	over 0.25	usually 6 - 15	1:1 1:0.85-1:1.35	11:1 7:1 - 13:1	0.21-0.26	Filtered or no direct sunlight
IV.2	Partly cloudy with a shaded sun position	IV : a= -1 b= -0.55	2 : c= 2 d= -1.5 e= 0.15	usually over 0.3	over 0.25	over 15	1:2.5 1:1.35 - 1:3	3:1 1.2:1 - 3.5:1	0.18 - 0.23	Filtered or no direct sunlight
IV.3	Cloudy with brighter circumsolar effect	IV : a= -1 b= -0.55	3 : c= 5 d= -2.5 e= 0.3	usually 0.3 - 0.5	0.25-0.43	usually 6 - 12	1:2.5 1:1.35 - 1:3	6:1 3.5:1 - 7:1	0.16 - 0.20	Filtered direct sunlight
IV.4	Cloudy or partly cloudy **) with a clear solar corona	IV : a= -1 b= -0.55	4 : c=10 d= -3 e= 0.45	usually 0.1 - 0.4	0.06-0.32	usually 1.5 - 4	1:2.5 1:1.35 - 1:3	11:1 7:1 - 13:1	0.14 - 0.18	Direct sunlight in accordance with Tv
V.4	Very clear (unturbid) with a clear solar corona	V : a= -1 b= -0.32	4 : c=10 d= -3 e= 0.45	usually 0.08 - 0.2	0.05-0.12	usually 1.5 - 4	1:3.5 1:3 - 1:5	11:1 7:1 - 13:1	0.12 - 0.17	Corresponding to the current CIE Clear Standard
V.5	Cloudless polluted with a broader solar corona	V : a= -1 b= -0.32	5 : c= 16 d= -3 e= 0.3	usually 0.15 - 0.45	0.10-0.37	usually 3 - 8	1:3.5 1:3 - 1:5	17:1 13:1 - 20:1	0.12 - 0.16	Corresponding to the current CIE Polluted Standard
VI.5	Cloudless turbid with a broader solar corona	VI : a= -1 b= -0.15	5 : c= 16 d= -3 e= 0.3	usually 0.15 - 0.5	0.10-0.43	usually 4 - 10	1:7 over 1:5	17:1 13:1 - 20:1	under 0.13	Direct sunlight in accordance with Tv
VI.6	Quasi-cloudy **) and turbid with a wide solar corona effect	VI : a= -1 b= -0.15	6 : c=24 d= -2.8 e= 0.15	usually 0.2 - 0.6	0.12-0.55	usually 6 - 12	1:7 over 1:5	25:1 over 20:1	under 0.12	Direct sunlight in accordance with Tv

Note : **) Quasi-cloudy skies are usually more homogeneous formed by a certain degree of turbidity and diffuse cloudiness (Cs or As cloud types) in contrary to broken cloudiness (e.g. Cu, Ac or Cc types) which in accordance with actual cloud cover can be considered either as cloudy (white with blue patches) or partly cloudy (blue - white)

Fonte: Kittler, Perez e Darula (1997)

As Tabelas 5(a) e 5(b) mostram, para cada tipo de céu, os coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e *e* que devem ser utilizados na formulação proposta.

Os modelos propostos por Kittler, Perez e Darula (1997) são associados com alguns descritores caracterizados por diferentes intervalos, dos quais se destacam:

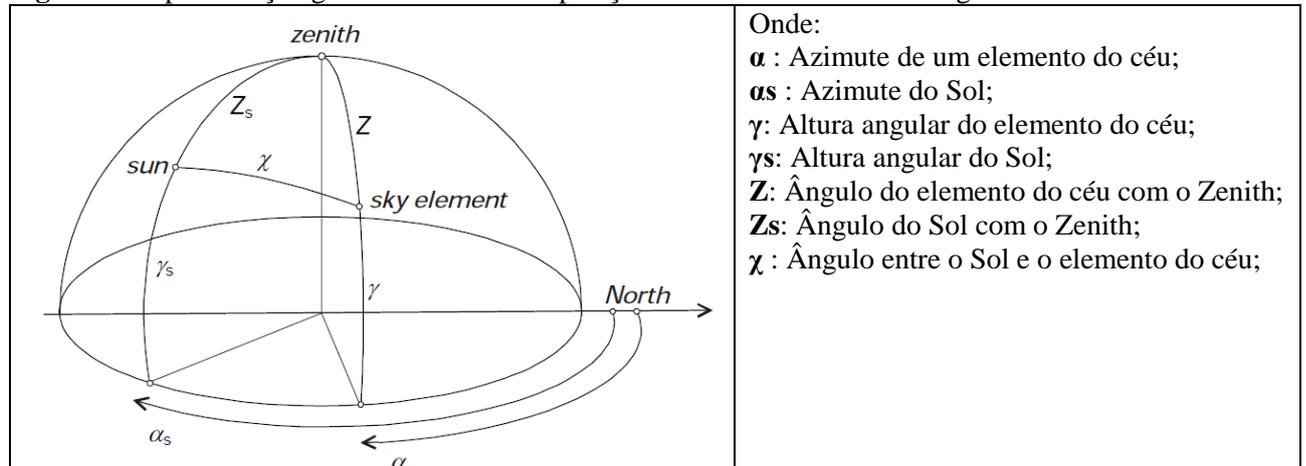
- a) Relação entre a Iluminância Difusa (*D_v*) e a Iluminância Extraterrestre Horizontal (*E_v*) dada pela razão *D_v* / *E_v*.
- b) O grau do Brilho.
- c) O Índice de Turvamento
- d) Relação entre a Luminância do Zenit (*L_z*) e a Iluminância Difusa (*D_v*) dada pela razão *L_z*/*D_v*.

Este último descritor, *L_z*/*D_v*, apresenta o problema de supor o conhecimento da luminância zenital, o que na análise dos diferentes tipos de arquivos climáticos consultados (diferentes padrões e localidades) praticamente a grande maioria não dispõe deste dado, sendo ele, como citado acima, considerado uma das chaves do cálculo. Além disso, os próprios autores consideram este descritor limitado a alguns tipos de céu e alturas solares.

As Tabelas 5(a) e 5(b) mostram também que as faixas de variação de todos os descritores associadas a cada tipo de céu observadas pelos autores, que permitem identificar as características de cada tipo de céu e, inversamente, através deles identificar um determinado tipo de céu, apresentam intervalos de variação que podem caracterizar, no conjunto, mais de um tipo de céu.

Este conjunto de padrões de céu é que configurará a Norma **ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E** (CIE, 2004), cuja conceituação esquemática genérica é descrita na Figura 7:

Figura 7: Representação genérica definindo a posição do Sol e de um elemento genérico do Céu.



Fonte: Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E (2004)

O ângulo *χ* entre o Sol e um elemento do céu é dado pela Fórmula 20:

$$\chi = \text{acos}(\cos(Z_s) * \cos(Z) + \sin(Z_s) * \sin(Z) * \cos(|\alpha - \alpha_s|)) \quad (20)$$

Onde:

- χ** : Ângulo entre o Sol e o elemento do céu;
- α** : Azimute de um elemento do céu;
- α_s** : Azimute do Sol;
- Z** : Ângulo do elemento do céu com o Zenith;
- Z_s** : Ângulo do Sol com o Zenith;

A determinação da luminância para uma dada posição do céu é dada pela mesma Fórmula (19), que combina os coeficientes de Graduação e Indicatriz de acordo com as Fórmulas (17) e (18) apresentadas acima.

Particularmente no horizonte a Graduação é dada pela Fórmula 21:

$$\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (21)$$

Particularmente no Zenith a Graduação é dada pela Fórmula 22:

$$\varphi(0) = 1 + a \cdot \exp b \quad (22)$$

Particularmente no Zenith a Indicatriz é dada pela Fórmula 23:

$$f(Z_s) = 1 + c \cdot \left[\exp(dZ_s) - \exp\left(d\frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \quad (23)$$

Os parâmetros **a**, **b**, **c**, **d** e **e** correspondentes a cada tipo são dados na Tabela 6:

Tabela 6: Parâmetros para a fórmula de determinação da distribuição de luminâncias de cada tipo de céu, com a descrição das características de cada um dos 15 tipos.

Tipo	Graduação	Indicatriz	a	b	c	d	e	Descrição
1	I	1	4	-0,7	0	-1	0	CIE Standard Overcast Sky, Steep luminance gradation towards zenith, azimuthal uniformity.
2	I	2	4	-0,7	2	-1,5	0,15	Overcast, with steep luminance gradation and slight brightening towards the sun
3	II	1	1,1	-0,8	0	-1	0	Overcast, moderately graded with azimuthal uniformity
4	II	2	1,1	-0,8	2	-1,5	0,15	Overcast, moderately graded and slight brightening towards the sun
5	III	1	0	-1	0	-1	0	Sky of uniform luminance
6	III	2	0	-1	2	-1,5	0,15	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, slight brightening towards the sun
7	III	3	0	-1	5	-2,5	0,3	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, brighter circumsolar region
8	III	4	0	-1	10	-3	0,45	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, distinct solar corona
9	IV	2	-1	-0,55	2	-1,5	0,15	Partly cloudy, with the obscured sun
10	IV	3	-1	-0,55	5	-2,5	0,3	Partly cloudy, with brighter circumsolar region
11	IV	4	-1	-0,55	10	-3	0,45	White-blue sky with distinct solar corona
12	V	4	-1	-0,32	10	-3	0,45	CIE Standard Clear Sky, low luminance turbidity
13	V	5	-1	-0,32	16	-3	0,3	CIE Standard Clear Sky, polluted atmosphere
14	VI	5	-1	-0,15	16	-3	0,3	Cloudless turbid sky with broad solar corona
15	VI	6	-1	-0,15	24	-2,8	0,15	White-blue turbid sky with broad solar corona

Fonte: Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E (2004)

Em trabalhos posteriores à proposição da nova geração de modelos em 1997 e anteriores à norma, Darula e Kittler (2002), diante da dificuldade de precisar os modelos a partir de dados relativamente variáveis, os autores apresentam um método analítico para determinação da Luminância do Zenith a partir dos dados de Iluminância Global, Difusa e Direta, obtidos através dos arquivos climáticos ou analiticamente. Neste trabalho é mencionada a imprecisão em que pode incorrer a determinação deste valor através da fórmula de predição desta grandeza proposta por Perez et ali (1990) (KITTLER e DARULA, 2000; KITLLER et ali, 2000; DARULA e KITTLER, 2002).

Os autores consideram que, se não houver informações disponíveis para fins de simulação, por exemplo, níveis globais medidos, durações de Sol ou coberturas de nuvens, A Luminância do Zenith pode ser definidas a partir de descritores típicos, o Turvamento (T_v) e a razão entre a Iluminância Horizontal Difusa e a Extra-Terrestre equivalente (D_v/E_v), conforme descritos na Tabela 7:

Tabela 7: Valores típicos de descritores associados com cada tipo de céu.

Tipo de céu	Código de céu	Parâmetros típicos		
		T_v	A	D_v/E_v
1	I.1	Acima de 45	Eq. (13) não é válida	0.10
2	I.2	Acima de 20		0.18
3	II.1	Acima de 45		0.15
4	II.2	Acima de 20		0.22
5	III.1	Acima de 45		0.20
6	III.2	Acima de 20		0.38
7	III.3	12.0	13.27	0.42
8	III.4	10.0	10.33	0.41
9	IV.2	12.0	8.70	0.40
10	IV.3	10.0	8.28	0.36
11	IV.4	4.0	5.01	0.23
12	V.4	2.5	3.30	0.10
13	V.5	4.5	4.76	0.28
14	VI.5	5.0	4.86	0.28
15	VI.6	4.0	3.65	0.30

Fonte: Darula e Kittler (2002)

Os autores apresentam uma formulação para a determinação do Turvamento, usado como referência inicial.

O Fator de Turvamento Luminoso – T_v , que se aproxima do número ideal de claridade atmosférica representando um caso real, é obtido a partir da Fórmula 24:

$$\frac{P_v}{E_v} = \frac{G_v}{E_v} - \frac{D_v}{E_v} \quad (24)$$

Onde:

E_v = Iluminância Horizontal Extraterrestre, correspondente à Iluminância Extraterrestre Normal corrigida pelo seno do ângulo da altura solar γ , equivalendo a $133,8^* \sin \gamma$;

P_v = Iluminância Direta Horizontal;

G_v = Iluminância Global Horizontal;

D_v = Iluminância Difusa Horizontal ;

Uma vez determinada a relação P_v/E_v pode-se determinar o turvamento T_v pela Fórmula 25:

$$T_v = \frac{-\ln^* (P_v/E_v)}{(av * m)} \quad (25)$$

Onde

T_v : Fator de Turvamento

E_v = Iluminância Horizontal Extraterrestre;

P_v = Iluminância Direta Horizontal;

m = massa de ar penetrada (massa de ar ótica relativa);

av = coeficiente de perda luminosa ideal (coeficiente de extinção), dependente de m e considerando a altura solar γ_s em graus;

A massa de ar ótica m é dada pela Fórmula 26:

$$m = \frac{1}{\sin \gamma_s + 0.50572(\gamma_s + 6.07995^\circ)^{-1.6364}} \quad (26)$$

O coeficiente de perda av é dado pela Fórmula 27:

$$av = \frac{1}{9.9 + 0.043 m} \quad (27)$$

O Tipo de Céu é dado pela aproximação do valor do Turvamento T_v e da relação D_v/E_v com os valores da Tabela 7 (acima).

Conhecido o Turvamento T_v , a razão D_v/E_v e o tipo de céu, pode-se utilizar a Tabela 8 com os parâmetros para as fórmulas de Luminância do Zenith correspondentes às situações com presença ou não de Sol.

Tabela 8: Parâmetros para a formulação de cálculo da Luminância do Zenith segundo os tipos de céu, em unidades absolutas.

Sky type	Sky code	Parameter					
		A1	A2	B	C	D	E
1	I.1	*)		54.63	1.00	0.00	0.00
2	I.2	*)		12.35	3.68	0.59	50.47
3	II.1	*)		48.30	1.00	0.00	0.00
4	II.2	*)		12.23	3.57	0.57	44.27
5	III.1	*)		42.59	1.00	0.00	0.00
6	III.2	*)		11.84	3.53	0.55	38.78
7	III.3	0.957	1.790	21.72	4.52	0.63	34.56
8	III.4	0.830	2.030	29.35	4.94	0.70	30.41
9	IV.2	0.600	1.500	10.34	3.45	0.50	27.47
10	IV.3	0.567	2.610	18.41	4.27	0.63	24.04
11	IV.4	1.440	-0.750	24.41	4.60	0.72	20.76
12	V.4	1.036	0.710	23.00	4.43	0.74	18.52
13	V.5	1.244	-0.840	27.45	4.61	0.76	16.59
14	VI.5	0.881	0.453	25.54	4.40	0.79	14.56
15	VI.6	0.418	1.950	28.08	4.13	0.79	13.00

*) Céu considerado sem Sol. O parâmetro A não é aplicável

Fonte: Darula e Kittler (2002)

Segundo os autores, se o Turvamento é maior que 12, o céu é considerado sem a presença de Sol e a Luminância do Zenith pode ser calculada pela Fórmula 28:

$$L_z = \frac{D_v}{E_v} \left[\frac{B(\sin \gamma_s)^c}{(\cos \gamma_s)^d} + E \sin \gamma_s \right] \quad (28)$$

Onde:

L_z : Luminância do Zenith dada em kcd/m^2

E_v = Iluminância Horizontal Extraterrestre;
 D_v = Iluminância Difusa Horizontal;
 γ_s = altura solar
 B, C, D e E = Coeficientes conforme a **Tabela 8**.

Para períodos ensolarados, quando o Turvamento é dado por $T_v \leq 12$, então a Luminância do Zenith pode ser determinado pela Fórmula 29:

$$L_z = A * \sin \gamma_s + 0.7 * (T_v + 1) \left(\frac{(\sin \gamma_s)^C}{(\cos \gamma_s)^D} \right) + 0.04 * T_v \quad (29)$$

Onde:

L_z : Luminância do Zenit dada em kcd/m^2

T_v = Turvamento;

γ_s = altura solar

C , e D = coeficientes conforme a **Tabela 8**.

A = coeficiente correspondente a $A_1 * T_v + A_2$, extraíndo-se A_1 e A_2 da **Tabela 8**.

2.3 PROCESSOS BASEADOS NO MODELO DE PEREZ E NA PLATAFORMA RADIANCE

O Modelo de Perez (PEREZ et ali, 1990) continua dominante nos procedimentos computacionais até hoje, embora tenham sido propostos mais modelos de céu que os 8 especificados por ele, inclusive com sua participação, em Kittler, Perez e Darula (1997), que se tornariam posteriormente o escopo da norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E 2003 (CIE, 2004). Também são dominantes as aplicações que utilizam mecanismos de cálculo da plataforma Radiance, baseada no Ray Tracing Recursivo. Portanto vamos analisar alguns aspectos de procedimentos de simulação que utilizaram e utilizam ainda tanto o Modelo de Perez quanto o Ray Tracing, procurando extrair aspectos relativos ao modo de enfrentar o problema das simulações de iluminação natural baseadas no clima (Climated Based Daylight Simulation – CBDS) atualizadas.

Muitas ferramentas existem para o processo de criação de arquivos climáticos, checagem de projetos e simulações anuais completas de luz natural. Os mais amplamente utilizados, segundo ENERGY DESIGN RESOURCES (2008) são: ADELIN, AGI32, Daysim, Daylight 1-2-3, EPSr, Lumen Micro, RADIANCE e SPOT. O texto considera que os programas AGI32 e Lumen Micro, que não são baseados nos engenhos de Ray Tracing do Radiance e sim em algoritmos de Radiosidade, e que não possuem algoritmos de cálculo para simulação dinâmica, podem entretanto ser usados para determinar o DA, mas de forma muito trabalhosa.

Já para Reinhart et ali (2006) os programas mais adequados para realizar as simulações anuais são todos baseados nos engenhos de cálculo do Radiance, conforme indicado na Tabela 9:

Tabela 9: Fac simile da tabela de Programas de Simulação Dinâmica segundo o engenho e algoritmos de cálculo, com endereço do site (obs. não foram visitados todos)

Program	Simulation Engine	Dynamic Simulation Algorithm	Web Sites (Last Accessed Mar 2006)
Adeline	Radiance	statistical sky	www.ibp.fhg.de/wt/adeline/
Daysim#)	Radiance	daylight coefficients & Perez	www.daysim.com
ESP-r	Radiance	daylight coefficients & Perez	www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm
Lightswitch Wizard#)	Radiance	daylight coefficients & Perez	www.buildwiz.com
SPOT (>ver 4.0)#)	Radiance	Annual CIE sky simulation	www.archenergy.com/SPOT

#)Uses the validated Daysim method which is based on a modified version of the Radiance program "rtrace".

Fonte: Reinhart et ali (2006)

Observa-se que o programa SPOT não utiliza o conceito de DLC e sim uma abordagem que utiliza a relação entre iluminância direta e difusa para avaliar entre céu nublado e limpo, segundo informa o site do programa:

“SPOT: The annual calculations are based on IESNA recommended CIE sky models that are modified by annual climate (TMY2) data. The calculation method uses the direct illuminance (illuminance from a 5° circumsolar region) and diffuse illuminance (sky illuminance) to weight cloudy and sunny conditions. The method provides annual accuracy similar to the daylight coefficient approach of the DAYSIM software or 3-phase daylight coefficient methods. Note, that while annual averages with this method will be fairly accurate, specific day illuminances (particularly under partly cloudy skies) are close estimates but will never accurately represent a future partly cloudy sky condition.” (SPOT PRO V.5, 2015)

Outra relação de programas, mais ampla, é apresentada por Welle (2009), conforme descrito na Tabela 10:

Tabela 10: Relação de Programas de Simulação de Iluminação, indicando endereço na internet, disponibilidade e comentários sobre cada um (obs. sites não todos visitados)

Software	Information	Cost	Comments
SPOT	http://www.archenergy.com/SPOT	Free	GUI to Radiance, Excel based, easy to use, dynamic
SkyCalc	http://www.energydesignresources.com/tools/skyclac.html	Free	Excel based, used for skylights
SuperLite	http://eetd.lbl.gov/btp/superlite20.html	Free	Radiosity, not used much
Trace-Pro	http://www.lambdares.com/	\$12,000	Good integration with CAD and CATIA but \$\$\$\$
Lumen Micro	http://www.lighting-technologies.com/	\$595	Radiosity, popular
ECOTECT	http://www.squ1.com/	\$90 Student License	DF calcs only, limited capabilities, exports to DAYSIM and Radiance
Radiance	http://radsite.lbl.gov/deskrad/	Free	Widely used simulation engine, no GUI, has both ray tracing and radiosity
Desktop Radiance	http://radsite.lbl.gov/deskrad/	Free	Not really functional at this time, old
Rayfront	http://www.schorsch.com/rayfront/	\$895	Website has been down all year
AGi32	http://www.agi32.com/	Free for us!	Radiosity, limited ray-tracing, very popular
DAYSIM	http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ie/lighting/daylight/daysim_e.html	Free	GUI to Radiance, good metrics, easy to use, dynamic

Fonte: Welle, 2009

Os trabalhos que estudam situações específicas relativas à edificação ou ao meio urbano e que usam estes procedimentos e as ferramentas computacionais que os propiciam, podem ser contados às centenas. São muito poucos, entretanto, os trabalhos que se concentram nos procedimentos, e menos ainda os que se dedicam também à análise de tempos de processamento que envolvem a realização dos trabalhos utilizando os procedimentos. Destacaremos neste tópico 3 trabalhos localizados considerados significativos e que também nos permitem avaliar ao menos superficialmente a questão também do tempo de processamento, além da forma de tratamento das simulações anualizadas. Destacamos que as avaliações temporais são muito relativas, pois dependem dos equipamentos utilizados, que apresentaram grande mudança de desempenho ao longo do tempo. Cada estudo também aborda uma problemática diferente e apresenta modo próprio de tratar o problema. Os estudos apresentam em comum a utilização dos mecanismos de cálculo do

Radiance diretamente ou através do programa Daysim (JAKUBIEC E REINHART, 2012), além de utilizarem o Modelo de Perez conforme aqui descrito.

Não é objetivo destas considerações apresentar referenciais comparativos entre os estudos realizados e a proposta desta tese, senão que ampliar o universo compreensivo do âmbito em que o problema é tratado, dentro do qual pretendemos colocar a consistência e viabilidade de nossa proposta.

Antes de apresentarmos os 3 trabalhos, colocaremos o modelo de processamento utilizado no programa Daysim formulando a ferramenta baseada no Radiance para determinação do Daylight Coefficient - DLC a partir da proposição de Tregenza e Waters (1983).

2.3.1 – Característica da Simulação Dinâmica Baseada nos Engenhos de Cálculo do Daysim / Radiance.

Na literatura acadêmica que envolve a simulação dinâmica, a grande maioria dos trabalhos discute o estudo de ambientes, arquitetônicos ou urbanos, e não a utilização da ferramenta em si.

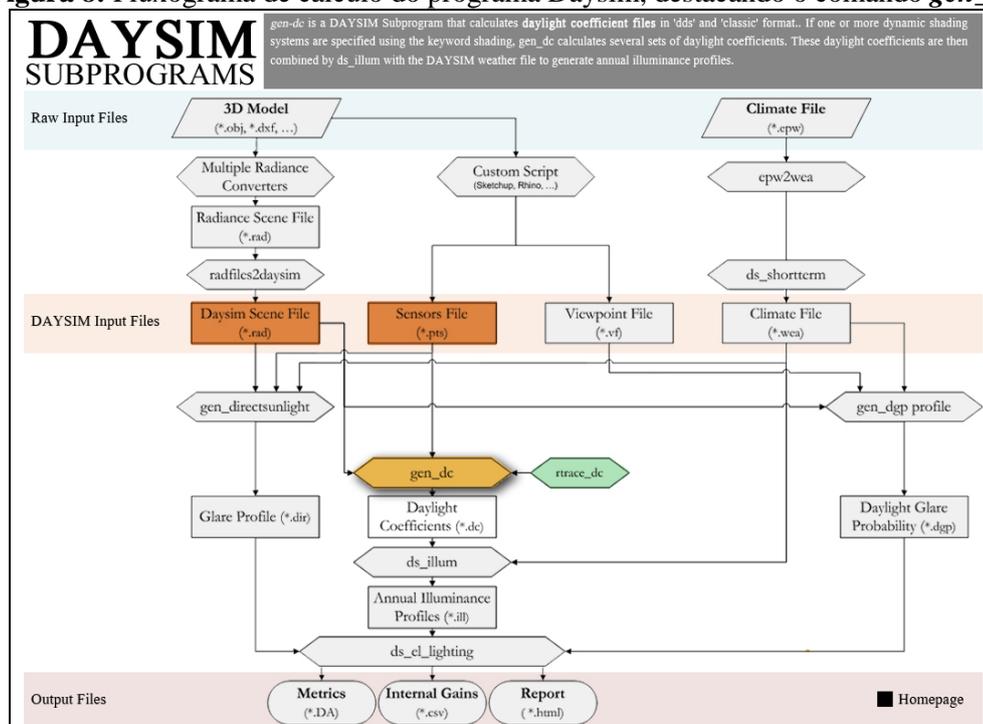
A maioria dos trabalhos relacionados com a Simulação Dinâmica de Iluminação Natural (Dynamic Daylight Simulation – DDS) apoiam-se na utilização do programa Daysim¹². O Daysim utiliza as ferramentas de cálculo do Radiance e interage, entre os principais, com os programas Rhinoceros (através do plug-in Diva) assim como com SketchUp e Ecotec (DAYSIM, 2015a).

O Radiance, propriamente, não gera o Daylight Coefficient (DLC). Este procedimento foi desenvolvido por Christoph Reinhart através do comando *gen_dc* para o Daysim (DAYSIM, 2015c).

A primeira implementação foi feita por John Mardaljevic em 1997 como uma ferramenta de pesquisa para uso interno baseada no padrão Radiance. Uma implementação do DLC para usuário final, o DAYSIM, foi criada por Reinhart em 2000 (MARDALJEVICK, 2006 e 2006-b).

Na Figura 8 temos o fluxograma de cálculo do Daysim (DAYSIM, 2015b), destacando a posição do comando *gen_dc* na geração do arquivo de DLC, arquivos com extensão *.dc*:

Figura 8: Fluxograma de cálculo do programa Daysim, destacando o comando *gen_dc*

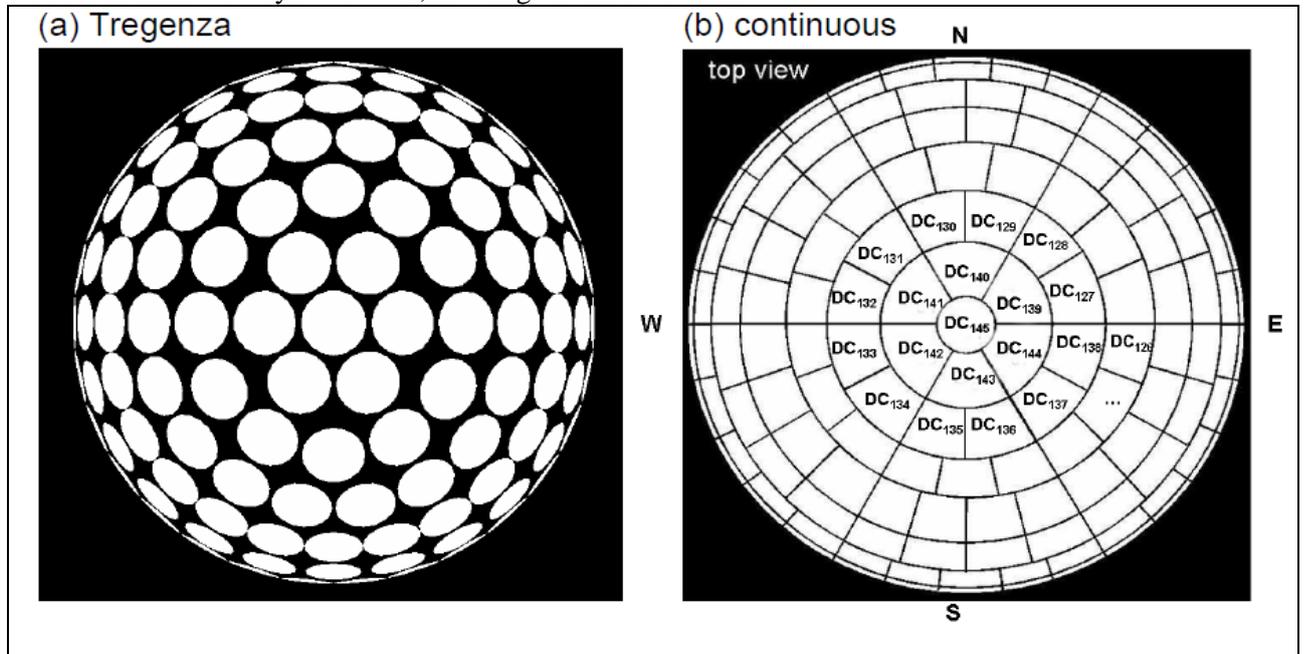


Fonte: DAYSIM (2015 b)

¹² O plug in DIVA, para o modelador Rhinoceros 3D é praticamente igual ao Daysim, quando se trata de lidar com o DLC.

A caracterização do hemisfério celeste no Daysim deriva do modelo de Tregenza e Waters (1983), estabelecendo, entretanto, uma outra configuração para os 145 segmentos celestes propostos originalmente como troncos de cone. No Daysim eles são configurados de forma contínua, cobrindo todo o hemisfério, o que não acontecia na proposição original. A diferença pode ser observada na Figura 9:

Figura 9: Comparação do modelo de Tregenza, com cones de abertura em torno de 10.15 graus (a) e o modelo adotado no Daysim e DDS, com segmentos contínuos.



Fonte: Bourgeois, Ward and Reinhart, 2008

Os arquivos de DLC possuem um completo conjunto de coeficientes associados a cada segmento da abóbada para cada um dos sensores especificados no arquivo de sensores. O número de linhas corresponde ao número de sensores. Em cada linha, o formato é como segue:

1) Formato Daysim Clássico (utilizado nas simulações estáticas):

- a) **coluna 1 – 145:** 145 DLCs difusos, de acordo com a divisão do hemisfério celestial proposta por Tregenza (1983).
- b) **coluna 146-148:** 3 DLCs para o solo (red, green, blue).
- c) **coluna 149-213:** 65 DLCs diretos (radiação direta do Sol). O número pode variar de acordo com a latitude do local.

2) Formato DDS (utilização em simulações dinâmicas – DDS)

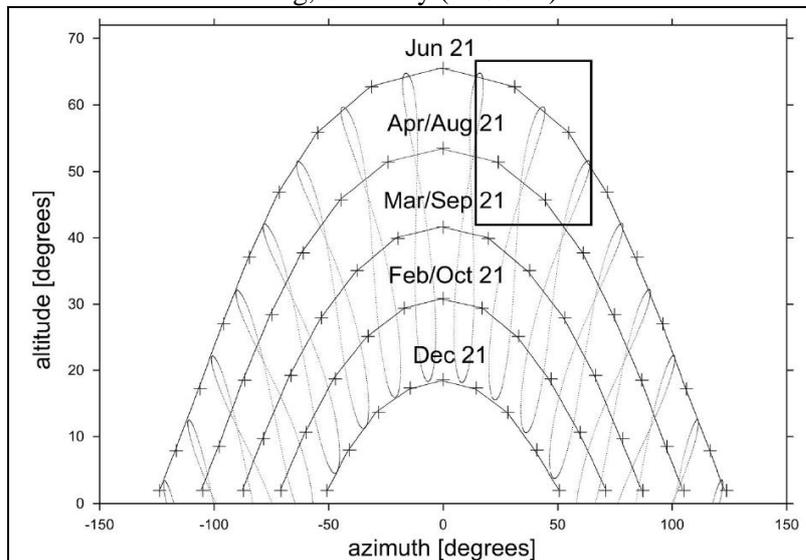
- a) **coluna 1 – 145:** 145 DLCs difusos, de acordo com a divisão do hemisfério celestial proposta por Tregenza (1983).
- b) **coluna 146:** 1 DLCs para o solo.
- c) **coluna 147-292:** 145 DLCs diretos-indiretos (independentes da latitude).
- d) **coluna 293-2597:** 2.305 DLCs diretos-diretos (independentes da latitude).

O trabalho de Bourgeois, Ward and Reinhart (2008) descreve o método de determinação do DLC para simulações estáticas e dinâmicas no Daysim.

No modo clássico, além da componente difusa e da contribuição do solo, a contribuição direta do Sol é determinada pelo cálculo de 65 posições solares correspondentes às posições

horárias do Sol segundo a latitude, desconsiderando-se posições de até 2 graus acima do horizonte¹³, conforme mostrado no exemplo da Figura 10:

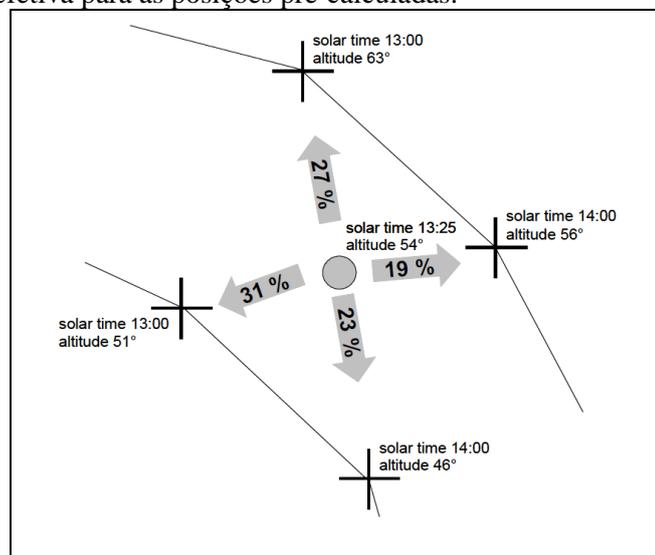
Figura 10: Exemplo de posições solares para o DLC direto na localidade de Freiburg, Germany (47.98°N)



Fonte: Bourgeois, Ward and Reinhart (2008).

No processamento de uma dada situação de iluminação natural, a posição real do Sol é interpolado a partir das 4 posições pré-calculadas que envolvem a posição de cálculo, sendo feita então a interpolação dos valores do fluxo para cada uma das posições, conforme exemplificado na Figura 11:

Figura 11: Interpolação da contribuição do Sol da posição efetiva para as posições pré-calculadas.



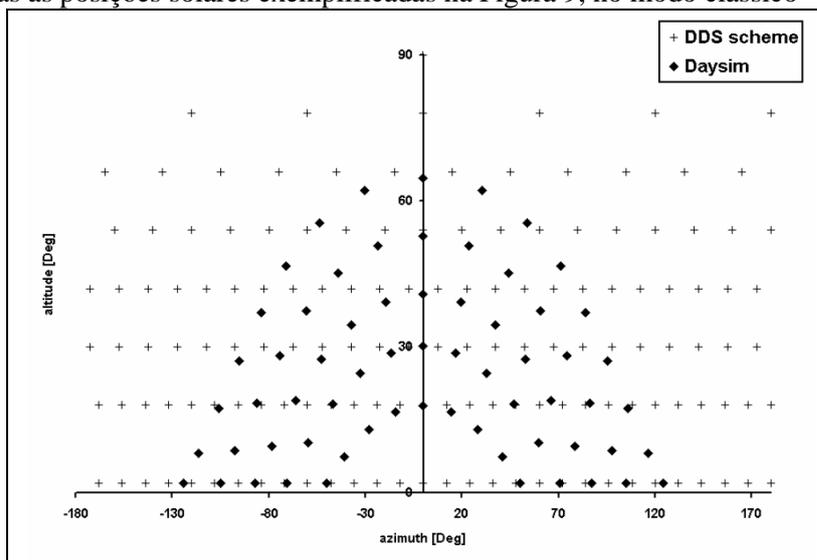
Fonte: Bourgeois, Ward and Reinhart (2008).

No procedimento relacionado à simulação dinâmica (DDS), os autores acrescentam um conjunto de DLCs relacionados à contribuição indireta do Sol que denominam componente direto-indireto, ou seja, aquela luminosidade que vem através da reflexão solar em outras superfícies. Aqui uma inovação é introduzida, estabelecendo-se um conjunto de 145 posições possíveis do Sol no hemisfério celeste, coerente com o modelo de parcelamento para o DLC difuso. Desta forma, a

¹³ Os autores consideram que com o Sol mais próximo do horizonte há distorções no modelo de Perez et ali (1993).

posição do Sol pode ser inscrita para qualquer latitude, tornando o modelo independente desta. Da mesma forma que a componente difusa do DLC, todas as posições são calculadas. No procedimento de cálculo o mesmo conceito de interpolação é adotado, mas agora para todo o hemisfério. Durante a determinação da anualidade, a posição do Sol é interpolada para as 4 posições que a circunscrevem, sendo então todos os outros componentes direto-indiretos considerados como valor zero, garantindo que somente a contribuição relativa à posição corrente do Sol seja computada. O conceito é mostrado na Figura 12:

Figura 12: Mapeamento de azimutes / alturas solares considerando todo o hemisfério, para cálculo da componente DLC direta – indireta no modo DDS. Anotadas as posições solares exemplificadas na Figura 9, no modo clássico



Fonte: Bourgeois, Ward and Reinhart (2008).

Para a componente direta do Sol (direto-direto) o mesmo conceito de integralidade do hemisfério foi utilizado, aumentando-se a resolução para 2.305 coeficientes, correspondendo a uma fragmentação equivalente a 16 vezes (4x4) das parcelas originais do hemisfério, mantendo-se uma parcela (menor que a original) no Zenith ($144 \times 16 + 1 = 2.305$). No procedimento de cálculo a interpolação também se dá entre as 4 posições que circunscrevem a posição do Sol.

Desta forma, o padrão DDS determina 2.596 coeficientes para cada sensor, sendo 89% deles reservados para descrever a posição direta do Sol.

Os DLCs correspondentes a cada segmento ou posição podem então ser associados com um modelo de céu, por exemplo dos modelos de Perez (1993), como descrito na Fórmula 30 (BOURGEOIS; WARD; REINHART, 2008) abaixo :

$$E = \sum_{\alpha=1}^{145} DC_{\alpha}^{sky} L_{\alpha}^{sky} S_{\alpha}^{sky} + DC_{\alpha}^{gr} L_{\alpha}^{gr} S_{\alpha}^{gr} + \sum_{\alpha=1}^{145} W_{\alpha}^{isun} DC_{\alpha}^{isun} L_{\alpha}^{isun} S_{\alpha}^{isun} + \sum_{\alpha=1}^{2305} W_{\alpha}^{dsun} DC_{\alpha}^{dsun} L_{\alpha}^{dsun} S_{\alpha}^{dsun} \quad (30)$$

Onde:

E: é a iluminância no sensor;

DC: é o Daylight Coeficiente correspondente à posição α do céu;

LS: indica a luminância associada à posição α do céu

sky, gr, isun e dsun: indicam as componente difusa, do solo ,direta-indireta e direta direta.

W: é o coeficiente associado às componentes associadas ao Sol, que determina quais dos coeficientes são valorados e quais são zerados. Indicam as 4 posições para as quais foram interpolados os valores da posição de cálculo do Sol.

As informações sobre o subprograma *gen_dc* destacam que ele toma um tempo substancialmente maior para rodar que qualquer outro programa devido à quantidade de *ray-tracing* envolvida (DAYSIM, 2015c). No entanto nenhum parâmetro objetivo indica o tempo que pode demorar o cálculo.

Segundo Reinhart: “A combinação do Radiance com os Daylight Coefficients de Perez podem eficiente e seguramente modelar séries temporais anuais de iluminância com um erro médio relativo de 20%” (REINHART, 2012, slide 13/23).

Ao realizar um estudo de processamento distribuído em várias CPUs na simulação dinâmica de um segmento urbano na China, uma limitação do Daysim é considerada importante por Roudsari et ali (2012): “Como mencionado anteriormente, Daysim é limitado a um máximo de 5.000 pontos de teste” (ROUDSARI et ali, 2012, p.5).

2.3.2 – Trabalho 1: Comparação do Estado da Arte de Seis Métodos Baseados na Plataforma Radiance (2000)

O primeiro trabalho que destacamos é o de Reinhart e Herkel (2000), onde analisam a simulação anual de distribuição de iluminâncias de luz natural, realizando uma comparação do estado da arte à época de seis métodos baseados na plataforma Radiance.

O estudo considerou 2 ambientes: a) um ambiente de escritório simples; b) um edifício de escritórios com cinco andares, com cada andar constituído de 5 escritórios interligados por paredes parcialmente envidraçadas, constituindo 25 ambientes individuais, interligados cinco a cada andar pelos envidraçamentos.

Estes dois ambientes foram analisados segundo 6 métodos distintos. O primeiro deles foi um processamento como caso de referência, e o último uma nova proposição dos autores¹⁴.

Os 6 métodos estudados comparativamente foram:

1) O cálculo explícito das iluminâncias interiores para todas as 4.703 horas anuais de distribuição média das luminâncias celestes para o TRY (test reference year) de Freiburg , Alemanha (caso de referência);

2) O método baseado no Daylight Factor – DLF clássico¹⁵;

3) Programa ADELIN 2.0;

4) Dados climáticos classificados, baseados em Herkel e Pasquay¹⁶

5) ESP-r Versão série 9;

6) Novo método apresentado no trabalho, que utiliza então o DLC conforme proposto por Tregenza em 1983¹⁷ e desenvolvido em rotina C para cálculo no Radiance. Neste caso são utilizados dois tipos de coeficientes: um utilizando o cálculo da iluminância difusa e da direta (DC total), e outro considerando apenas o cálculo da iluminância difusa (DC diffuse)

Há que se considerar aqui o aspecto da disponibilidade de hardware para simulações à época.

Os autores observam: “O estudo concentra-se em como simulações do raytracing com o Radiance podem ser usadas para modelar o desenvolvimento do nível de iluminâncias interiores ao longo de um ano. Entretanto, erros de simulação intrínsecos ao raytracing ou devido a simplificações no modelo geométrico ou descrições de materiais são negligenciados.” (REINHART e HERKEL, 2000, p.168).

¹⁴ Esta nova proposição e a que fundamenta o comando *gen_dc* do Daysim)

¹⁵ O Daylight Factor definido como percentual que a iluminância que chega em um ponto do ambiente representa em relação à iluminância difusa externa.

¹⁶ O autor refere-se a trabalho não consultado aqui: S. Herkel, T. Pasquay. **Dynamic link of light and thermal simulation on the way to integrated planning tool**. In: 5th Int. IBPSA Conf. Praque, 1997, pp 307-312.

¹⁷ O autor refere-se ao trabalho de Tregenza e Waters, onde foi proposto o conceito de Daylight Coefficient: TREGENZA, P.R. WATERS, I. - **Daylight coefficients**. *Lighting Research and Technology* June 1983 15: 65-71

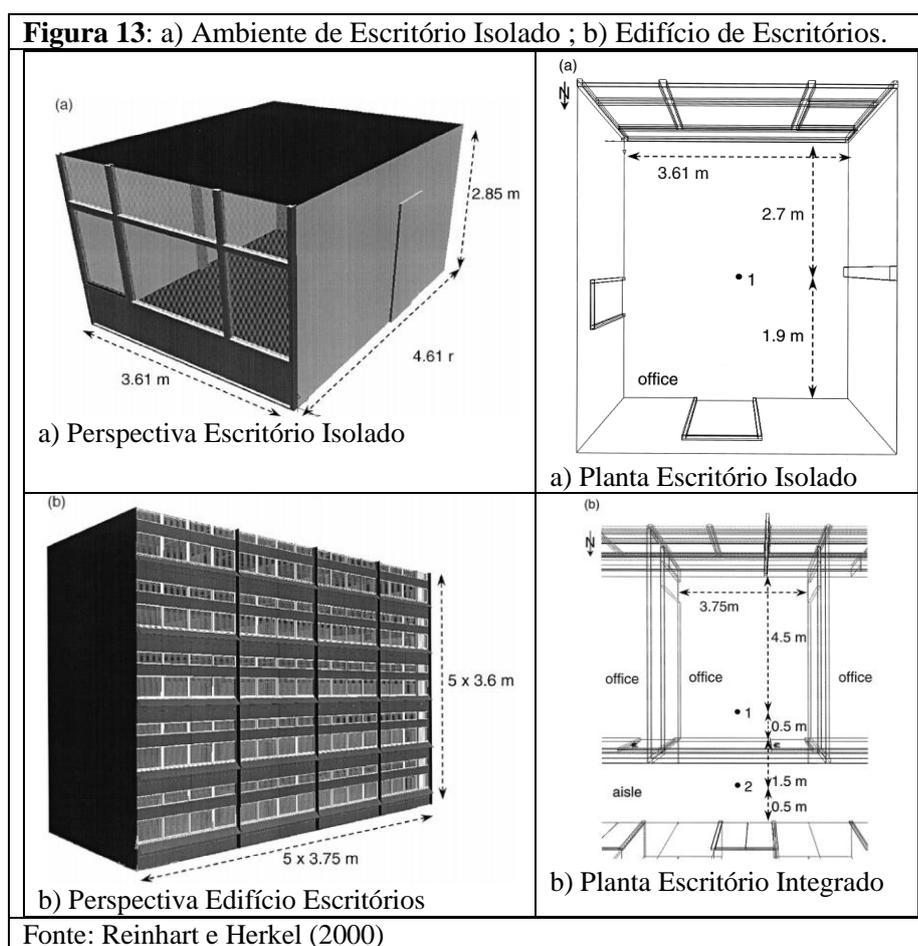
A metodologia considera que o método de referência (1) é o mais preciso (por isto é referência), mas considera que (à época) “ *O método (1) requer proibitivos longos tempos de cálculo.*”

O método do DLC (6) considera a proposição original de divisão do céu em apenas 145 segmentos. Os autores consideram que este método reduz significativamente o tempo de processamento, mas introduz 2 erros com relação à simulação completa anual:

a) Primeiro, a distribuição contínua de luminâncias do modelo de Perez é aproximada para uma função que uniformiza a luminância em cada um dos 145 segmentos, mas considera que este erro é minimizado pela própria margem de erro do modelo de conversão luminosa (PEREZ et al., 1990).

b) A posição anualizada do Sol é aproximada para um dos segmentos específicos, criando erros com relação à exposição ou não do sensor ao Sol¹⁸.

Os modelos simulados estão representados na Figura 13:



Foi colocado um sensor no ambiente isolado, à altura de 0,85 m, e no edifício com escritórios integrados foram colocados 2 sensores em cada ambiente, um no interior deste e outro no corredor, conforme mostrado na Figura 12(b).

Os resultados da análise dos autores são mostrados na Tabela 11 para o ambiente isolado e na Tabela 12 para o edifício de escritório, destacando, além do tempo de processamento, o Erro Médio Relativo (MBE) e o Erro Quadrático Relativo (RMSE), em %. Para o caso 2 (edifício) são apresentados apenas os resultados utilizando o Daylight Coeficiente e o ESP-r.

Tanto no caso do ambiente isolado quanto no edifício de escritórios, observa-se que o método que utiliza o Daylight Coeficiente na Iluminância Global e na Difusa é o que apresenta menor nível de erro em relação ao caso de referência. Apresenta também o menor tempo de

¹⁸ Esta proposição é depois melhorada atribuindo-se uma granularidade maior ao posicionamento do Sol, fragmentando-se a proposição de Tregenza, conforme visto em 2.3.1

processamento, lembrando que o cálculo foi feito para apenas um sensor no ambiente, e para dois sensores, no edifício. O tempo de referência para o cálculo pleno no ambiente foi de 12 dias, enquanto que na Iluminância Global usando o Daylight Coeficiente (céu com 145 direções, observe-se) foi de 1,5 h; no edifício a relação foi de 80 dias para 1 dia. Os autores utilizaram, nos casos de referência, processamento distribuído, considerando depois o conjunto extrapolado para uma única CPU, uma Workstation Pentium Pro 200 Mhz operando Linux.

Tabela 11: Resultados da simulação no sensor do ambiente isolado para cada um dos 6 métodos ensaiados. O método 6 apresenta os resultados de tempo para o cálculo da iluminância global (DC total) e difusa (DC diffuse) separadamente.

Simulation times and relative RSME and MBE with respect to the reference case of the six compared annual simulation methods for point (1) in the single office					
Internal illuminances in the single office	Global RMSE [%]	Diffuse RMSE [%]	Global MBE [%]	Diffuse MBE [%]	Simulation times
Reference case	–	–	–	–	12 days
DF	42	16	–33	–14	6 min
ADELINÉ	51	60	–38	–49	25 h
Classified	63	61	19	8	20 h
ESP-r	19	6	0	–3	3 h
DC total	16	3	2	2	1.5 h
DC diffuse	22	3	–8	2	8 min

Fonte: Reinhart e Herkel (2000)

Tabela 12: Resultados da simulação no sensor (2) do edifício para 3 dos métodos ensaiados: (1), (5) e (6). O método (6) apresenta os resultados de tempo para o cálculo da iluminância global (DC total) e difusa (DC diffuse) separadamente. (Os autores não publicam ou comentam o resultado do sensor 1 deste caso)

RMSE of the cumulative annual illuminance distributions with respect to the reference case of the two daylight coefficient methods for point (2) in the office building				
Office building	RMSE [%] for all values above 1 lx	RMSE [%] for < 1000 lx	RMSE [%] for < 500 lx	Simulation times
Reference case	–	–	–	80 days
ESP-r	37	54	46	2 days
DC total	6	2	1	1 days
DC diffuse	8	6	2	1 h

Fonte: Reinhart e Herkel (2000)

2.3.3 – Trabalho 2: Estudo de Área Urbana Naturalmente Iluminada Através de Simulação (2012)

O estudo de Dogan, Reinhart e Michalatos (2012) descreve uma nova ferramenta, plug-in do Modelador CAD Rhinoceros3D, que permite aos projetistas simular e avaliar o potencial de iluminação natural de pospostas de planos diretores urbanos. O estudo desenvolve-se em 2 passos: no primeiro, os níveis horários de radiação solar em todas as fachadas em uma cena urbana são simuladas baseadas nas ferramentas Radiance / Daysim; no segundo passo os níveis de radiação exterior são convertidos em distribuições horários de iluminâncias usando um modelo de resposta a impulso generalizado e Métricas de luz natural baseadas no clima, como Daylight Autonomy foram também computadas. Os resultados obtidos pelo novo método foram cuidadosamente comparados com as simulações regulares e mais demoradas realizadas no Daysim.

Os resultados, segundo os autores, encontram-se numa faixa de variação de 10% em relação com os resultados obtidos no Daysim, mas com significativa redução de tempo.

O estudo apresenta, segundo os autores, 2 inovações:

a) Um fluxo de trabalho que automatiza o processo de configuração de uma simulação urbana e visualização de resultados;

b) Uma metodologia que traduz dados de radiação horária exterior incidente nas fachadas em distribuição de iluminação interior para reduzir gastos computacionais.

O novo método é comparado com as tradicionais simulações detalhadas de iluminação natural usando Daysim / Radiance.

A estrutura global do programa envolve:

- a) Geração / manipulação da geometria usando Rhinoceros / Grasshopper;
- b) Exportação das informações geométricas (3D model and sensor point files) no formato Radiance / Daysim;
- c) Um roteiro é executado assumindo e acumulando os arquivos de entrada e executando as simulações exteriores;
- d) Retorno dos resultados ao Rhinoceros / Grasshopper que os computa e estima a iluminância interior;
- e) A Autonomia de Luz Diurna (Daylight Autonomy) é mapeada em cores na geometria para visualização.

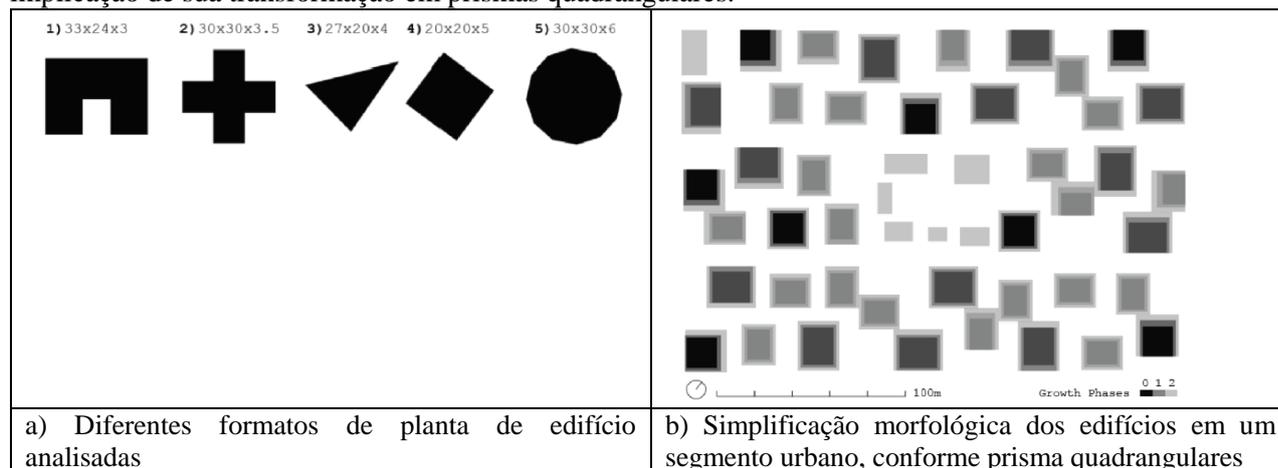
Segundo os autores:

“A busca por um método eficiente para computar a propagação da luz em um espaço é o coração deste estudo. De forma a estabelecer uma correlação que seja válida para todos os possíveis cenários e climas, toda a luz recebida na fachada deve ser difusa. É uma drástica simplificação, uma vez que elimina completamente a radiação solar na distribuição interior. Mais significativamente, ângulos solares baixos, que envolveriam uma penetração de energia solar em profundidade no espaço, não podem ser levados em conta na presente abordagem. A justificativa para a abordagem é que - devido a questões relacionadas ao brilho - os ocupantes do edifício necessariamente fecharão manualmente um sistema de controle uma vez que uma quantidade maior de radiação solar direta incidir sobre uma fachada.” (Dogan, Reinhart e Michalatos (2012), p. 615)

Ainda segundo os autores, o erro devido a esta simplificação está fortemente contido nas horas de menor insolação nas fachadas. Não fica claro no estudo que tipo de elemento de controle separa a radiação solar direta da difusa.

Um estudo preliminar testou diferentes geometrias, mostradas na Figura 14.a, que foram equivalidas a elementos retangulares, conforme a Figura 14.b:

Figura 14(a)(b): Estudo de simplificação morfológica analisando diferentes configurações de edifício e a implicação de sua transformação em prismas quadrangulares.

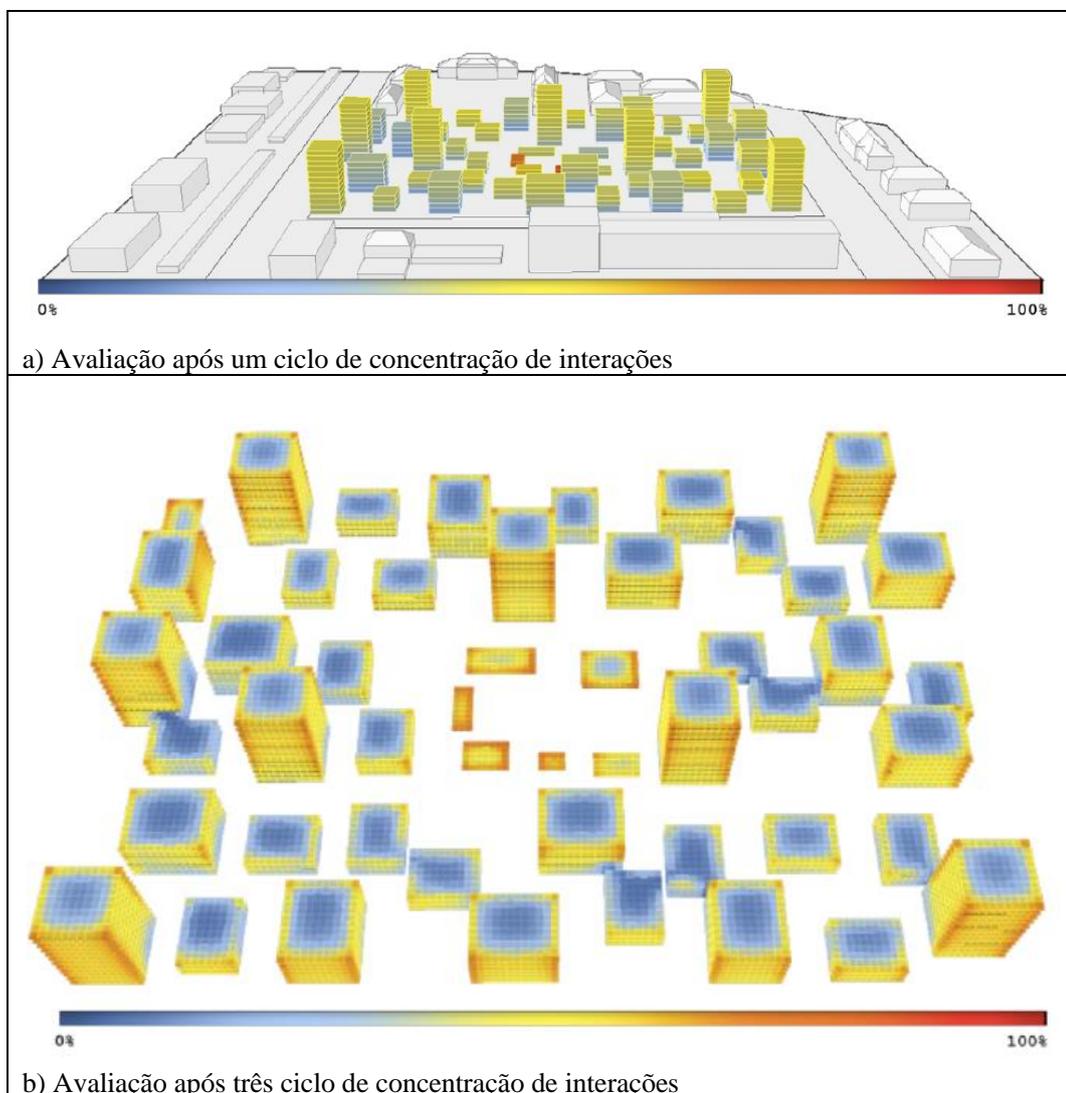


Fonte: Dogan, Reinhart e Michalatos (2012)

Os autores consideram também que esta simplificação formal não é tão significativa no erro que pode acrescentar aos resultados, mas não deixam claro qual a influência mais precisamente. Desta forma, os cenários são estereotipados de sorte a conter variações de prismas retos quadrangulares, sendo um segmento urbano simulado com os edifícios estratificados em pavimentos, com resultados por pavimento.

Na Figura 15(a)(b) estão mostrados os resultados da avaliação de um Daylight Autonomy (DA) para 500 lux em mais de 50% do pavimento, considerando 50% de fachada envidraçada, após 1 ciclo concentrado (a) e após 3 ciclos concentrados (b):

Figura 15: Resultados gráficos de simulação em segmento urbano considerando: um ciclo de interações (a) e 3 ciclos de interações (b) na avaliação de um DA para 500 lux.



Fonte: Dogan, Reinhart e Michalatos (2012)

Foram simulados dois climas: Munique / Alemanha (característico parcialmente nublado) e Phoenix, Arizona / EUA (característico com Sol). A simulação envolveu a determinação da exposição solar das fachadas, passo intermediário para a posterior determinação da autonomia de luz natural (DA). Além destes dois aspectos foi simulada a exposição horária ao Sol dos espaços exteriores, como indicador de qualidade urbana.

Em todas as simulações o equipamento utilizado foi um Macbook Pro com Processador Intel Core i7 rodando Windows 7 64 bits. Um total de 244 unidades / pisos separadas foram avaliadas em cada interação (denominadas concentrações).

O estudo não informa os parâmetros de simulação que foram adotados para a realização dos casos de referência na utilização do conjunto Daysim / Radiance. Não informa precisamente o número de sensores, mas aparentemente são dois por unidade, um na fachada e outro no interior, mas o estudo não esclarece precisamente.

O estudo destaca diferentes margens de erro, considerando resultados entre 7% a 18% de Erro Quadrático Médio (RMSE), considerando estes valores aceitáveis dentro do intervalo de erro que considera validado para o Daysim / Radiance, entre 6% e 26%. Observe-se no entanto que os

autores não consideram que este erro do novo modelo interagindo com o erro do Daysim pode de fato estar implicando numa somatória de erros, ao invés de estar contido na margem original, já que não há um caso real medido de referência. De qualquer forma, o estudo indica, o que nos interessa principalmente neste caso, é o tempo de processamento pleno da situação de referência realizado no Daysim / Radiance, que pode ser deduzido do ganho de tempo de processamento em relação ao método pleno, considerando a simulação de 1 unidade, de 5 unidades e de 244 unidades conforme mostrado na Tabela 13:

Tabela 13: Tempos de Processamento e grau de aceleração em relação ao método Radiance / Daysim

Simulation Scenario	Duration	Speedup
Dynamic blinds, 1 unit (case 1)(V1)	43 s	84 x
Static blinds, 5 units (case 2)(V1)	6 m	6 x
Real case, 244 units (case 3) (V1)	14 h	7.2 x
Real case, 244 units (case 3) (V2)	110 min	54.9 x

Fonte: Dogan, Reinhart e Michalatos (2012))

Surpreendentemente o artigo não comenta a Tabela 13 apresentada acima, nem qual a diferença entre o Caso Real V1 e o Caso Real V2. Pelo que pode se depreender do comentário, o primeiro refere-se a uma avaliação envolvendo a Autonomia de Luz Natural Contínua (Continuous Daylight Autonomy DA500lux – V2) e a Área Iluminada Naturalmente (Daylit área in sDA500lux/50% - V1).

De qualquer forma, o que nos interessa ressaltar é que o tempo gasto no processamento do caso de referência simulado através do conjunto Radiance / Daysim pode ser estimado em 100 horas, já que 110 minutos X 54.9 equivalem a 6.039 minutos. Ressalte-se que o modelo foi extremamente simplificado para ser usado similarmente em ambos os métodos.

Quanto ao resultado final, os autores consideram que o método “... *incrementa a velocidade de processamento em 54,9 vezes comparada à abordagem clássica do Daysim sem ligações dinâmicas.*” Consideram que os resultados, que apresentaram Erro Quadrático Médio variando de 7 % a 18% para a iluminância horária interior, “... *são aceitáveis e dentro da margem de precisão a que está submetido o engenho de simulação Daysim, que tem esse erro entre 6 e 26%.*” (Dogan et al., 2012, pp.619).

2.3.4 Trabalho 3: Estudo Comparado de Performance de Simulação CPU X Placa Gráfica (2014 / 2015)

No trabalho realizado por Jones e Reinhart (2014) temos um estudo comparativo entre o desempenho de rotinas do Radiance quando processadas diretamente na CPU através da compilação dos códigos fontes e o desempenho das mesmas rotinas quando programadas no Hardware de Placas Gráficas (GPU – Graphics Processor Unit).

O trabalho foi apresentado também em 2015 (JONES; REINHART; 2015), com uma apresentação de slides que nos servirá também de ilustração, na sequência.

Embora não seja um estudo diretamente ligado à questão das simulações anuais baseadas em arquivos climáticos, este trabalho nos permite entender melhor o contexto onde trabalha o Radiance quando processa um determinado ambiente, assim como a ordem de grandeza entre quantidades de raios emitidos para a descrição luminosa do ambiente e o tempo de processamento de uma determinada situação. É um trabalho bastante recente e foi o único encontrado, no universo pesquisado, que apresenta mais diretamente as questões atuais de tempo de processamento e suas

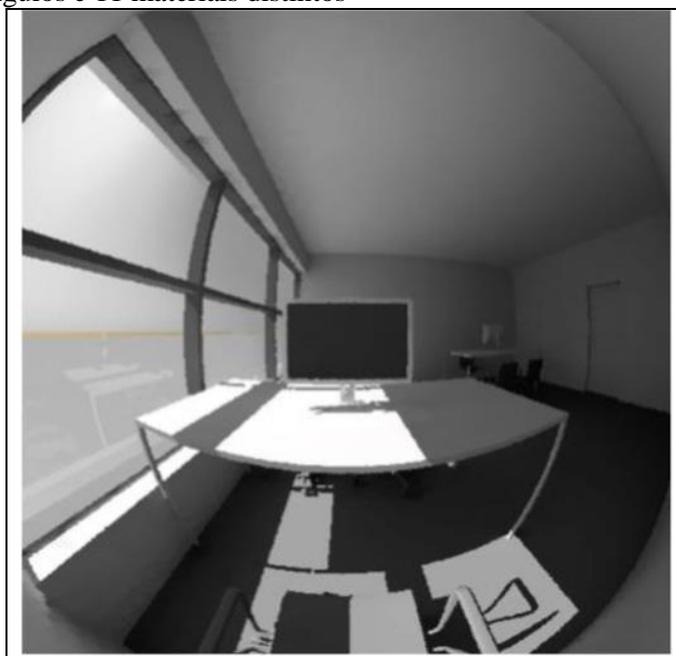
determinantes, podendo permitir alguma referência para uma avaliação da viabilidade do estudo apresentado nesta tese.

Foram analisadas as performances de dois comandos do Radiance: **RTrace** e **RPict**. O primeiro comando, **RTrace**, é o responsável pela determinação dos raios traçados e determinação das irradiações da cena (um ambiente modelado) considerando uma *octree*, uma estrutura de descrição hierárquica dos ambientes através raios (WARD et al., 1998). O segundo, **RPict**, produz imagens do cenário de um determinado ponto de vista para um dispositivo de saída (uma tela, p.ex.), usando também dados calculados em uma *octree*.

Segundo os autores: “*A melhoria de desempenho atingida usando a programação no hardware da GPU pode ser medida comparando o tempo de computação dos programas padrões RPICT e RTRACE com os tempos do código modificado utilizando os recursos de hardware do engenho de ray tracing OptiX.*” (Jones e Reinhart (2014), pp. 7)

Os testes foram obtidos com o modelo de complexidade moderada mostrado na Figura 16, constituída por 278.695 triângulos e 11 materiais distintos.

Figura 16: Ambiente típico de escritório, representado por 278.695 triângulos e 11 materiais distintos



(Fonte: Jones e Reinhart (2014), pp. 2)

Argumentos de entrada idênticos foram usados em ambos os programas, o padrão e o modificado e ambos foram compilados de códigos-fonte com idênticos parâmetros de compilação.

Os testes foram processados em duas estações de trabalho: a primeira com o processador Intel® Core™ i7-4770 de 3.4 GHz e placa gráfica NVIDIA® Quadro® K4000 com 768 cores CUDA™, representando estações de médio porte; a segunda com processador Intel® Xeon® E5520 com 2.27 GHz e placa gráfica NVIDIA® Tesla® K40 com 2880 cores CUDA™, representando estações e servidores de alta qualidade. As implementações padrões de RPICT e RTRACE foram testadas apenas na primeira estação, com o processador mais rápido.

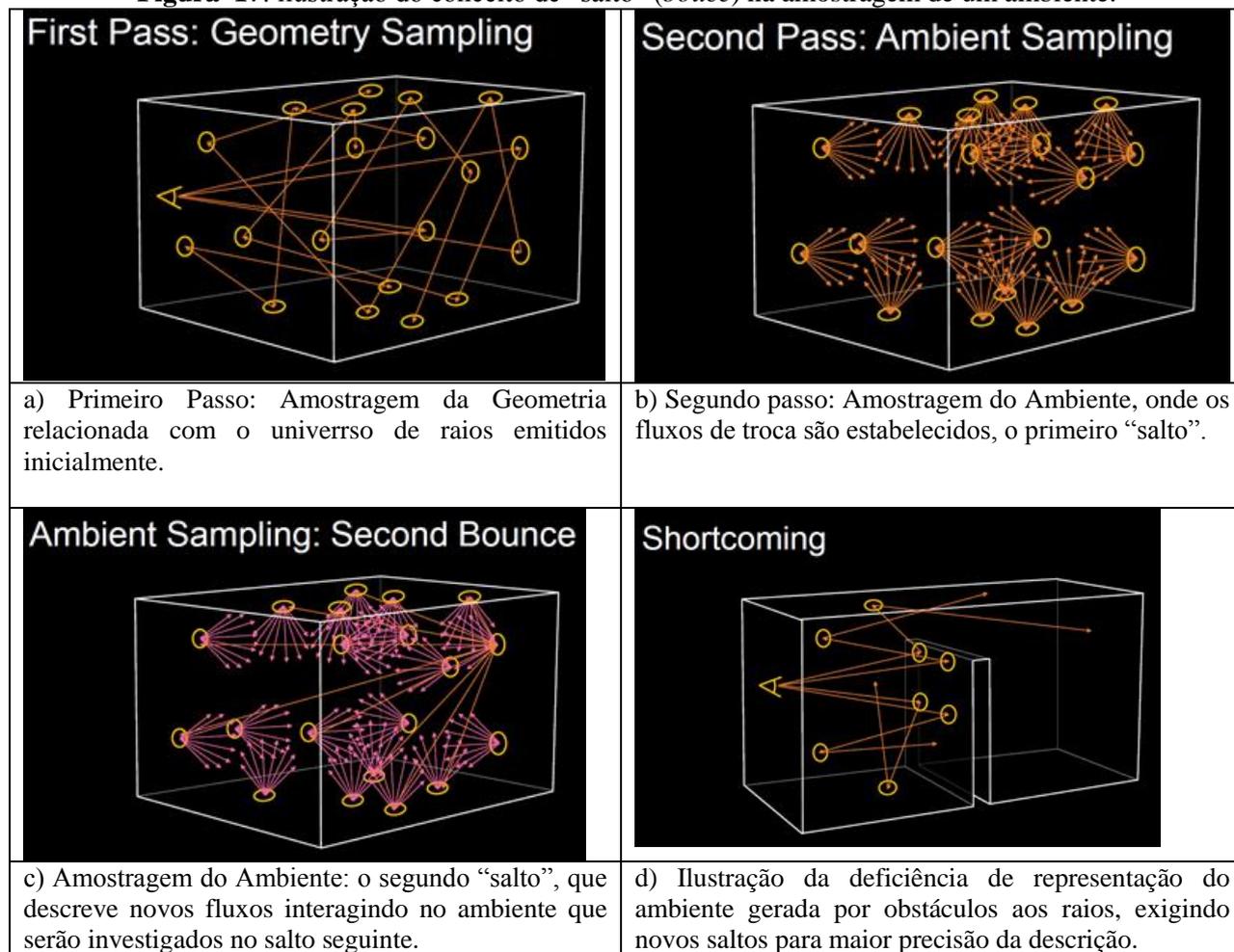
A imagem na Figura 16 levou 45 minutos para sintetizar através da CPU, na primeira estação.

Aqui é preciso entender melhor o conceito do programa **RTRACE**, que emite uma amostra de raios a partir de uma amostragem de pontos do ambiente, e vai aplicando “saltos” (*bounces*) de inter-reflexões através da nova emissão de amostras de raios para cada raio anterior, criando uma sucessão em progressão geométrica de amostragem. É importante observar que a descrição do ambiente é feita através de uma amostragem de raios que o descrevem, ou seja, no caso da Figura 15, nem todos os pontos definidos pelos 278.695 triângulos são investigados. Um dos parâmetros

do **RTRACE**, o parâmetro **-ad N** (*ambiente division*) determina o número de divisões do ambiente que é considerada, obtendo-se os valores para todos os pontos por interpolação. Um segundo parâmetro auxiliar **-aa D** (*ambient accuracy*) determina uma subdivisão maior quando uma grande diferença de valores de irradiação é obtido entre dois pontos da divisão do ambiente. O número de triângulos e materiais é relevante na determinação da construção da imagem, mas o tempo de processamento está associado principalmente ao número total de raios, o que implica também na limitação do número de triângulos efetivamente computados.

No trabalho apresentado em 2015 (Jones e Reinhart, 2015) podemos ter uma visualização do procedimento na sucessão de imagens representadas na Figura 17 (a,b,c,d), que ilustra o conceito de “salto” (*bounce*):

Figura 17: ilustração do conceito de “salto” (*bouce*) na amostragem de um ambiente.



Fonte: Jones e Reinhart, 2015

A cada “salto” na amostragem dos raios, o incremento é exponencial. Na Figura 18 temos o resultado das trocas de luz computadas no modelo da Figura 16 com duas amostragens diferentes de raios e os tempos de processamento em cada uma. Pode-se observar com clareza a diferença nos resultados obtidos.

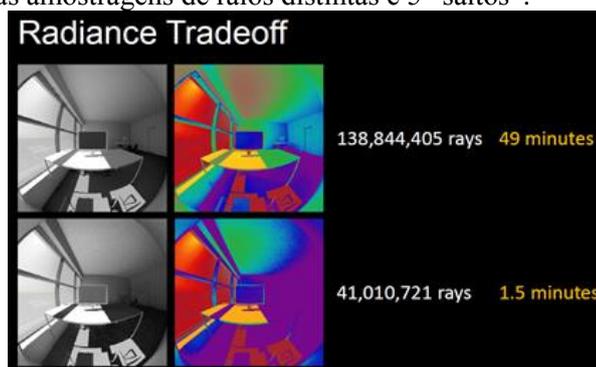
O estudo mostra ainda, na sequência, a diferença de tempos de processamento considerando o incremento na amostragem dos “raios primários”, que são o conjunto de raios lançados na primeira descrição.

Os autores descrevem assim o conceito de raios primários, bem como da estrutura básica de seu processamento:

“O algoritmo de *ray tracing* usado pelo Radiance é similar a todos os engenhos de *ray tracing* recursivo. Raios primários originários de um ponto comum (a câmera ou um sensor) são traçados até interceptarem uma superfície contida em uma estrutura hierárquica geométrica (no caso

do Radiance, uma *octree*). A cada interceptação, o material da superfície determina uma ação a tomar, a qual geralmente envolve emitir mais raios para amostrar as intensidades de luz difusa e direta refletidas ou transmitidas. Após completar estas ações, o valor resultante (usualmente uma cor) é associada ao raio inicial e retorna como o resultado do comando que emitiu o raio. O conjunto ou soma dos resultados dos raios primários produz a imagem ou a leitura do sensor, respectivamente. Conceitualmente, o cômputo de cada raio primário será similar, mas inteiramente independente de raios primários adjacentes, assim o algoritmo pode ser facilmente paralelizado.” (Jones e Reinhart , 2014, pp.3)

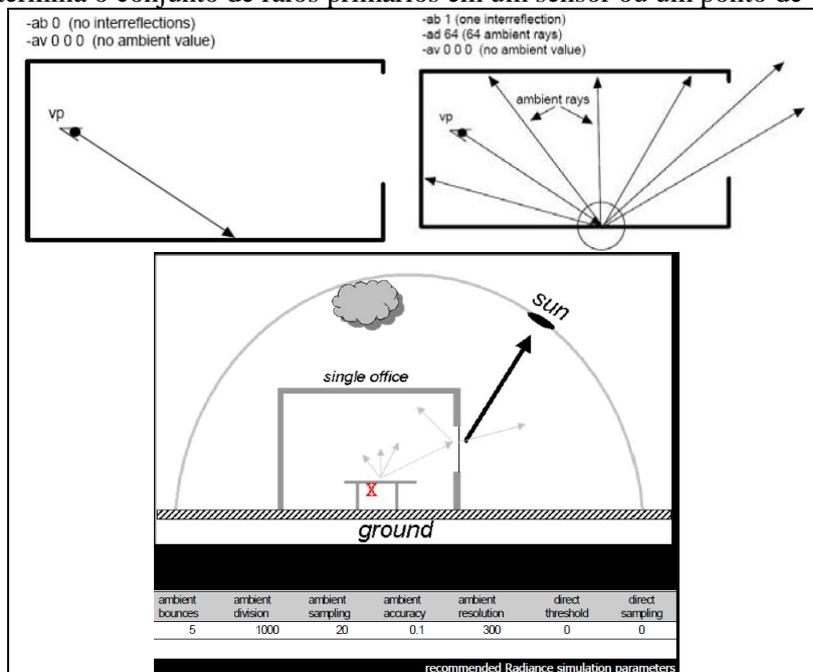
Figura 18: Comparativo de tempo de processamento com duas amostragens de raios distintas e 5 “saltos”.



Fonte: Jones e Reinhart, 2015

O conceito de paralelização está associado, no estudo, à possibilidade de processar cada raio simultaneamente com muitos outros no hardware da placa GPU, de forma a acelerar o processo. Estes conceitos são ilustrados por Reinhart (2012)¹⁹ na descrição do significado de parâmetros do Radiance, conforme mostrado na Figura 19:

Figura 19: Representação do conceito de Divisões do Ambiente, que determina o conjunto de raios primários em um sensor ou um ponto de vista.



Fonte: Reinhart, 2012, pp. 15-16

¹⁹ Muitos destes conceitos discutidos no texto de leitura, segundo os autores, estão contidos em: Reinhart C F, “Simulation-based Daylight Performance Predictions“, in Building Performance Simulation for Design and Operation, Editors J Hensen and R Lamberts, Taylor & Francis, 2011

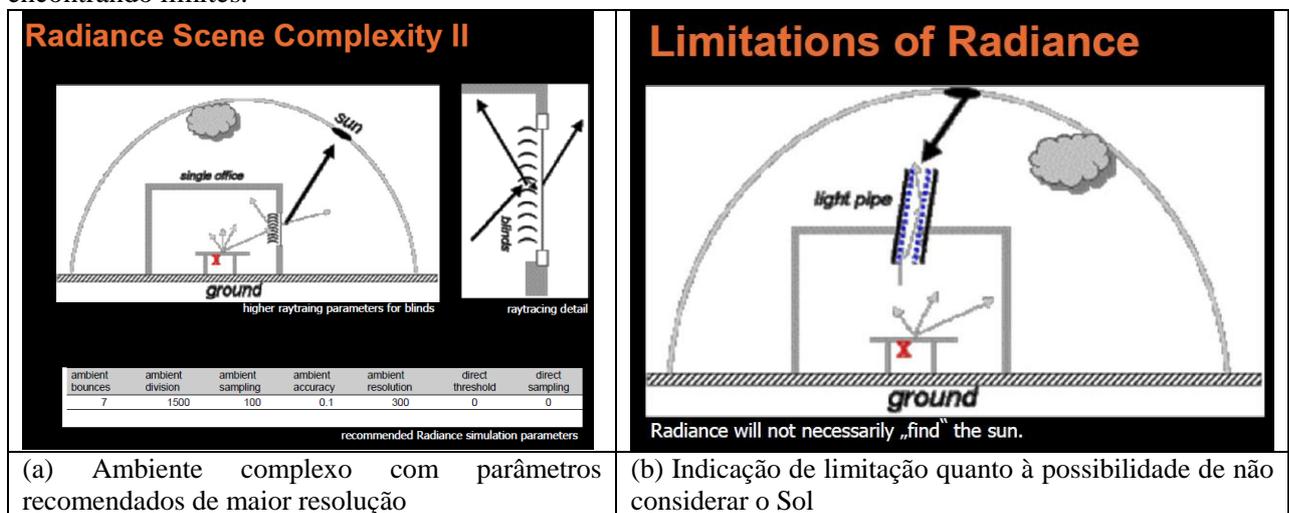
O parâmetro “ambiente division” (-ad, no Radiance) determina o número de raios primários emitidos para a descrição inicial do ambiente em um ponto. No caso de um sensor, considera-se o hemisfério como o campo de visão.

O parâmetro “ambiente sampling” (-as, no Radiance) determina o número de raios auxiliares emitidos quando dois raios primários adjacentes apresentam grande variação de irradiação.

São os dois principais parâmetros que interferem na determinação da precisão e tempo de processamento dos fluxos luminosos.

Na Figura 20 temos outros dois exemplos: (a) de um ambiente de maior complexidade, onde recomenda-se parâmetros de maior resolução; (b) ambiente com elemento complexo (tubo especular) onde indica-se uma limitação quanto à possibilidade de computar a luz direta do Sol, como indicação de limitações do Radiance:

Figura 20: Dois exemplos de como o Radiance trata situações de maior complexidade, inclusive encontrando limites.



Fonte: Reinhart (2012)

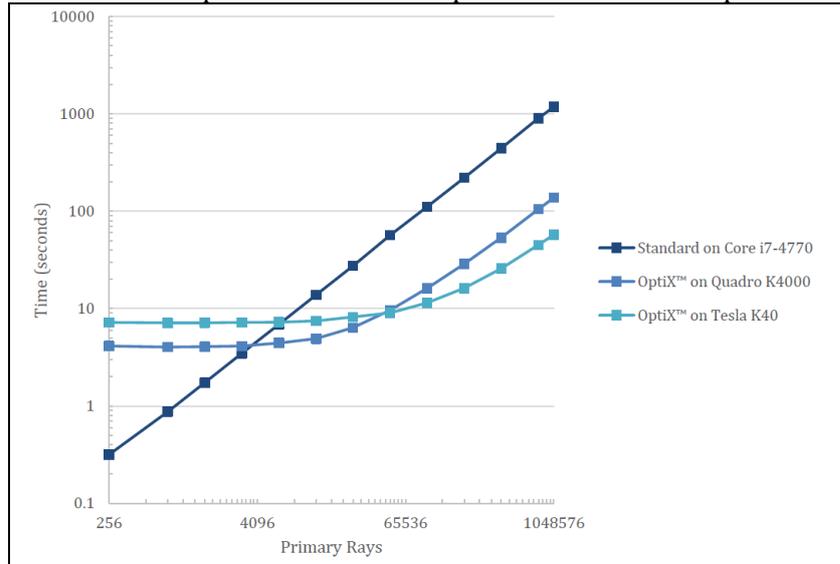
Estes exemplos demonstram como situações de maior complexidade envolvem maior número de raios. Há ainda outros comandos que podem interferir relacionados, por exemplo, com a precisão de interpolação de dados na construção de imagens, mas aqui não nos interessam, assim como não interessam ao estudo, devido ao seu menor impacto no tempo de processamento. De posse destes conceitos, pode-se entender melhor a Figura 21, que mostra o gráfico de tempos comparativos para a produção da mesma imagem mostrada na Figura 16 segundo a variação de raios primários emitidos para produção da imagem.

Associando-se os dados a imagens, apenas para efeito ilustrativo, a amostragem corresponderia a resoluções de 16 x 16 pixels (256), 64 x 64 pixels (4.096), 256 x 256 pixels (65.536) e 1.024 x 1.024 pixels (1.048.576), tendo-se como pressuposto que cada pixel de imagem seria calculado.

Considerando-se o cálculo de iluminação no ambiente, o gráfico corresponderia a um sensor com um universo de emissão de raios primários, na mais alta resolução, de 1.024 raios primários para cada raio emitido do sensor, emitindo-se 1.024 raios deste.

Ressaltamos o tempo aproximado de cálculo nas resoluções de 65.536, de cerca de 100 segundos, ou cerca de 1,66 minutos, e de 1.048.576, de cerca de 1.200 segundos, ou cerca de 20 minutos.

Figura 21: Gráfico do tempo de processamento, em segundos, utilizado pelo comando RTRACE Conforme o número de raios primários emitidos a partir de um sensor ou ponto de vista.

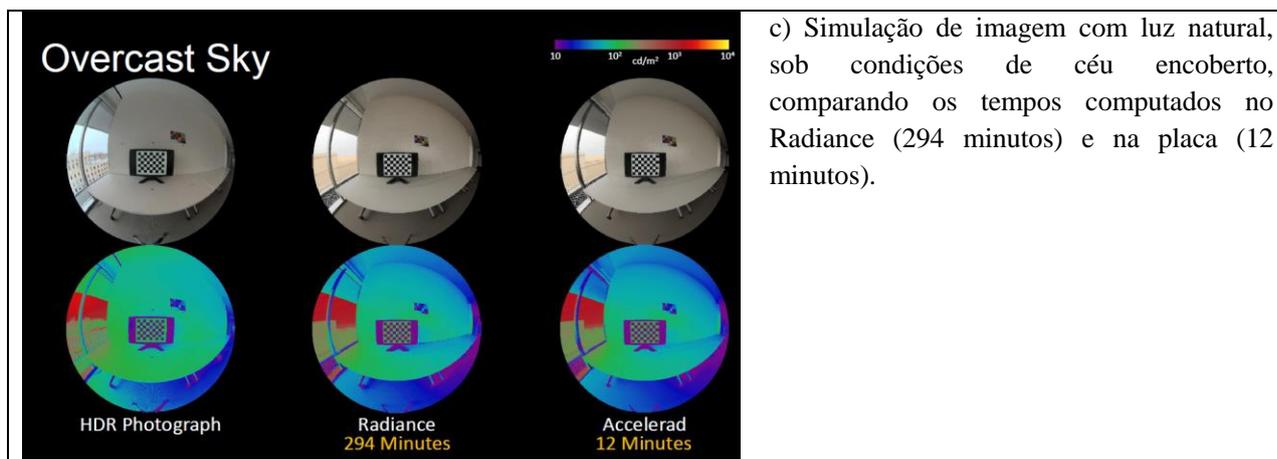


Fonte: Jones e Reinhart, 2014

Ainda na apresentação relacionado com a placa gráfica, Jones e Reinhart (2015) descrevem resumidamente dados de validação das rotinas programadas em placa, feitas através de comparação de resultados entre um ambiente fotografado em HDR (fotos de alta resolução) e o mesmo ambiente modelado, simulado na CPU e na placa gráfica, GPU, que nos mostram referência de tempo de processamento, conforme mostrado na Figura 22:

Figura 22: Estudo de validação dos cálculos realizados em CPU e através da placa gráfica – GPU.

<p>Validation Study</p>	<p>a) Ambiente fotografado em HDR e modelado em 3D, utilizado como referência da validação</p>
<p>Clear Sky, 9:30 AM</p> <p>HDR Photograph Radiance 303 Minutes Accelerad 11 Minutes</p>	<p>b) Simulação de imagem com luz natural, sob condições de céu limpo, comparando os tempos computados no Radiance (303 minutos) e na placa (11 minutos).</p>



c) Simulação de imagem com luz natural, sob condições de céu encoberto, comparando os tempos computados no Radiance (294 minutos) e na placa (12 minutos).

Fonte: Jones e Reinhart, 2015, pp. 34-35.

Observe-se que a intenção inicial deste último estudo era desenvolver rotinas na placa GPU para geração de resultados em tempo real. Embora os próprios autores indiquem o grande incremento de tempo obtido através da programação em placa frente aos resultados da CPU, obviamente um tempo de 11 minutos de processamento não pode ser considerado propriamente “tempo real”.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO CONCEITUAL

A ampla revisão realizada demonstrou a grande predominância do método Ray Tracing nas aplicações relacionadas com a determinação do potencial anual de aproveitamento da luz natural, assim como a utilização ampla do Modelo de Perez (PEREZ et al., 1993) na caracterização dos modelos de céu a partir da interpretação dos dados de arquivos climáticos utilizados na Simulação Dinâmica de Luz Natural (Dynamic Daylight Simulation – DDS, segundo BOURGEOIS, REINHART e WARD, 2008). Esta predominância se configura principalmente na ampla utilização dos programas Daysim e Diva for Rhinoceros, além de outros aplicativos baseados nos mecanismos do Radiance.

Por outro lado não foram localizados trabalhos tratando da utilização dos algoritmos da Radiosidade na Simulação Dinâmica de Luz Natural seja através do cálculo do Daylight Coefficients – DLC seja através de outro método.

Foram detalhados 3 trabalhos considerados relevantes para demonstrar que, mesmo com a grande capacidade computacional atual, a questão de cálculos de iluminação natural com precisão em ambientes complexos ainda demanda tempos significativos de processamento.

Também não foram localizados trabalhos que indiquem claramente como caracterizar precisamente cada um dos 15 modelos de céu da Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E através de uma inequívoca utilização de dados de radiação ou de iluminâncias globais e difusas, medidas ou calculadas.

Desta forma, concluímos que há espaço para interpretação destes modelos de conversão, assim como para uma proposição de simulação dinâmica da luz natural através do algoritmo da Radiosidade, como se pretende abordar na proposição conceitual desta tese.

3 CONCEITOS DO MODELO VETORIAL ESFÉRICO - MVE - USADOS NO PROGRAMA APOLUX

Neste tópico descreveremos os principais conceitos usados no programa APOLUX²⁰, que utiliza o Modelo Vetorial Esférico – MVE. Serão abordados também os procedimentos de validação a que já foi submetido e as ferramentas objetivamente já desenvolvidas, que são a base de desenvolvimento da nova proposta apresentada neste trabalho.

3.1 CONCEITOS GERAIS DO MODELO VETORIAL ESFÉRICO – MVE

O Modelo Vetorial Esférico – MVE - foi proposto por CLARO (1998) como uma nova abordagem, à época, do algoritmo de Radiosidade, como alternativa à abordagem do Hemi-Cubo conforme proposto por Cohen e Greenberg (1985) e aprimorado por Cohen et ali (1988) através do Refinamento Progressivo.

Há dois aspectos que diferenciam o MVE do método associando Hemi – Cubo + 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, caracterizado como um referencial geométrico e específico de cada superfície nas projeções para obtenção dos Fatores de Forma. Enquanto o método Hemi-Cubo propicia elementos geométricos para a determinação do valor numérico dos Fatores de Forma de um vértice, o Globo de Vetores fornece estes elementos e também uma descrição da visibilidade do vértice considerando um referencial orientado pelos pontos cardeais. Desta maneira, as projeções obtidas pelo MVE para todos os elementos do projeto têm a mesma referência direcional e, registradas, podem fornecer inúmeros tipos de resultados, como o cálculo dos Fatores de Forma, caracterização luminosa das abóbadas, a projeção de Máscaras de Sombreamento e gráficos para avaliação qualitativa de ofuscamento²¹.

2) O MVE estabelece uma dissociação entre a determinação dos Fatores de Forma e a aplicação da Equação da Radiosidade, propriamente dita, que no método clássico são associadas e assim fundamentam o Refinamento Progressivo. No Refinamento Progressivo é feito o cálculo da iluminância inicial nos vértices do projeto e os Fatores de Forma são então calculados considerando inicialmente apenas as superfícies com maior luminância, sendo progressivamente considerados os novos valores de luminância que vão surgindo e calculados os novos Fatores de Forma à medida em que o fluxo é transferido através das conduções luminosas. Desta maneira, a cada nova situação de iluminação, os Fatores de Forma devem ser novamente calculados em função da nova distribuição de luz, num modo conhecido como “on the fly” (COHEN et ali, 1988). Considerando-se que geralmente nos estudos envolvendo iluminação natural são necessárias inúmeras simulações, o registro em separado dos Fatores de Forma minimiza significativamente os cálculos posteriores envolvendo a aplicação da equação da radiosidade para determinação das condições de iluminação. Se considerarmos a aplicação pura e simples do método do Hemi-Cubo com o Refinamento Progressivo na simulação dinâmica anual, cada situação teria que ser calculada separada e isoladamente, numa sucessão de aplicações de uma simulação estática. Além disso, a separação

²⁰ A versão pública atual está disponível em <http://foton.arq.ufsc.br/> contendo as capacidades descritas neste tópico. É atualmente uma versão gratuita.

²¹ Estes gráficos de ofuscamento ainda não estão disponibilizados na versão pública citada, pois a ferramenta está em fase de consolidação para publicação.

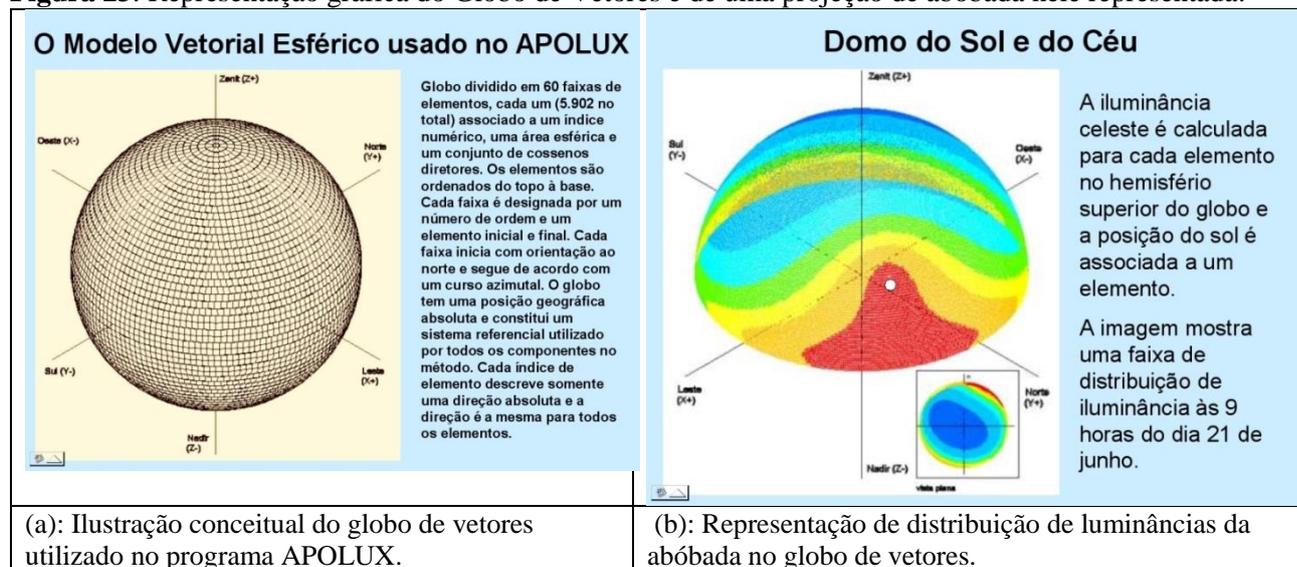
proposta no MVE permite a utilização dos Fatores de Forma para outras finalidades que não a simulação estática, como se verá no desenvolvimento deste trabalho.

O Modelo Vetorial Esférico utiliza o Globo de Vetores para determinação da Visibilidade (Fatore de Forma).

O Globo de Vetores é, na verdade, um conjunto de ângulos sólidos pré-tabelados que cobrem toda uma esfera considerada a partir de um ponto central. O Globo de Vetores tem uma orientação única, que combina o referencial cartesiano de coordenadas (X, Y, Z) com a orientação dos pontos cardeais, criando um referencial único de característica geográfica.

O hemisfério superior do Globo representa a abóbada celeste. A Figura 23 ilustra o conceito do Globo de Vetores (a) e mostra uma representação de distribuição de luminâncias da abóbada nele (b). No programa não existem as parcelas físicas, propriamente ditas, como na ilustração, apenas os ângulos sólidos que elas definem ao terem seus vértices unidos ao centro. Geometricamente, no entanto, ele é uma esfera de raio unitário cuja superfície é dividida em parcela de acordo com a intersecção dos ângulos sólidos definidos pela resolução do Globo com a superfície geométrica da esfera. Um método matemático vetorial projeta todos os objetos do espaço nesta esfera e associa as parcelas que representam as projeções às direções do Globo a ela associadas. O Norte do Globo corresponde ao eixo +Y cartesiano, enquanto o Leste corresponde ao eixo +X e o Zenith ao +Z para todo e qualquer vértice de qualquer superfície do projeto, assim como para a caracterização da abóbada celeste.

Figura 23: Representação gráfica do Globo de Vetores e de uma projeção de abóbada nele representada.



Fonte: Claro (1998)

O modelo espacial utilizado no processamento, preparado a partir de um arquivo DXF²², e que denominaremos doravante de Projeto, é constituído por planos que são divididos em parcelas triangulares de áreas menores, representadas por um vértice em cada parcela. Esta subdivisão é requerida para garantir-se que as iluminâncias de cada parcela seja uniforme, condição requerida pela equação da radiosidade. A triangulação permite uma abordagem mais eficiente das projeções conforme construído o método. A quantidade de vértices em um projeto é uma das componentes que relaciona precisão de resultados e tempo de processamento.

Os planos válidos atualmente no Projeto de simulação são:

²² DXF: Data Exchange File é um arquivo digital padrão internacional de descrição de entidades gráficas

a) Planos Principais: são de materiais opacos difusos, transmissores difusos e transmissores especulares. Estes planos são considerados os protagonistas das trocas luminosas no projeto;

b) Planos de Análise: recebem a iluminância inicial do céu e a contribuição inter-refletida dos Planos Principais através da Radiosidade e constituem planos não físicos, apenas de posicionamento de referência para determinação de iluminâncias (podem ser assemelhados a planos especulares 100% transmissores). Caracterizam-se como planos de trabalho nas avaliações normalizadas, mas também como planos que interceptam fluxos em análises mais avançadas, como por exemplo incidência de radiação em uma abertura de janela.

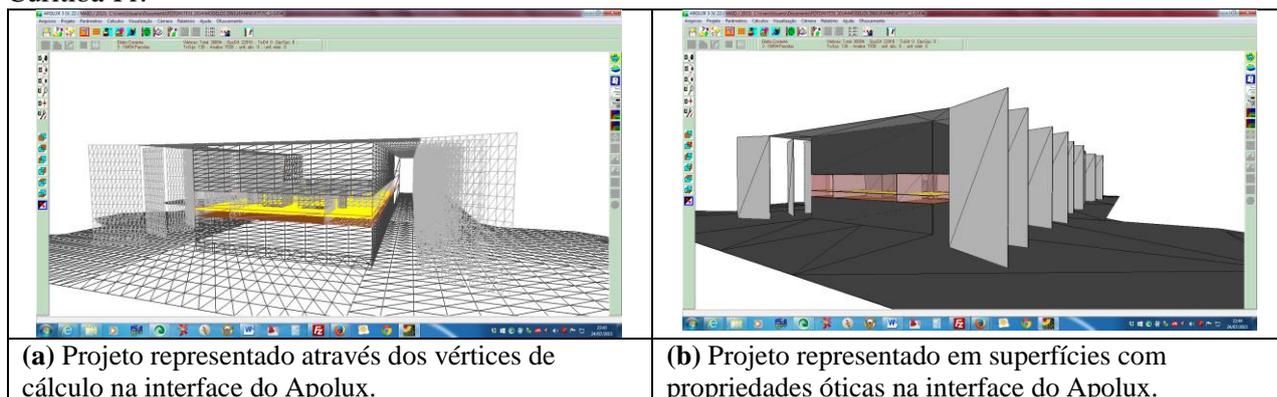
c) Planos de Luminância Uniforme: estes planos são opacos e considerados fontes secundárias, que recebem luminosidade do céu e transferem o fluxo para os Planos Principais e de Análise, mas não participam da Inter-reflexão na Radiosidade. São úteis na modelagem de obstruções do entorno do projeto de sorte a considerar esta influência sem sobrecarregar o cálculo. Podem ter uma Luminância uniforme determinada a partir de seu posicionamento no espaço, sujeito ao céu corrente no cálculo e considerado sem obstruções em seu hemisfério. Servem para determinar as obstruções da abóbada exteriores ao ambiente de estudo no projeto, assim como fontes iniciais secundária que apenas contribuem na determinação da iluminância inicial dos planos principais e análise.

d) Planos de Luminárias. Correspondem a planos opacos que apenas obstruem direções da visibilidade de um vértice, sem participarem como fontes ou como protagonistas. Apenas servem para verificar obstruções provocadas pelo corpo de luminárias que podem influir na determinação do fluxo inicial incidente no ambiente. A contribuição das luminárias, quando existe, é determinada a partir das curvas fotométricas localizadas em um ponto central dos planos de luminária, considerado em separado no cálculo. Os planos são projetados na determinação da visibilidade e os pontos fotométricos de cada luminária são projetados depois da visibilidade, para determinar se estão visíveis ou não no vértice analisado. Ou seja, parte de uma luminária pode estar visível e seu centro fotométrico não, ou ainda a luminária está visível pela parte de trás, obstruindo mas não iluminando o vértice em que se está determinando a visibilidade.

A versão atual do programa não trata de materiais opacos especulares, embora conceitualmente o possibilite. Mas estes materiais, em geral, são pouco comuns na arquitetura, e seu tratamento ainda não é muito eficiente dentro do modelo da radiosidade adotado no MVE. Vem sendo desenvolvida uma abordagem mais eficiente dos planos opacos especulares como planos iniciais também, como os planos uniformes, mas isto não é objeto desta tese.

Na Figura 24 temos o projeto de um modelo tridimensional, com a indicação do fracionamento dos vértices de cálculo **(a)** e a representação em superfícies de características óticas **(b)**.

Figura 24: Exemplo de um modelo tridimensional de um projeto de simulação, criado como simplificação do Projeto de simulação desenvolvido por Pinto (2014) para avaliação do Tribunal de Contas do Paraná, em Curitiba-Pr.

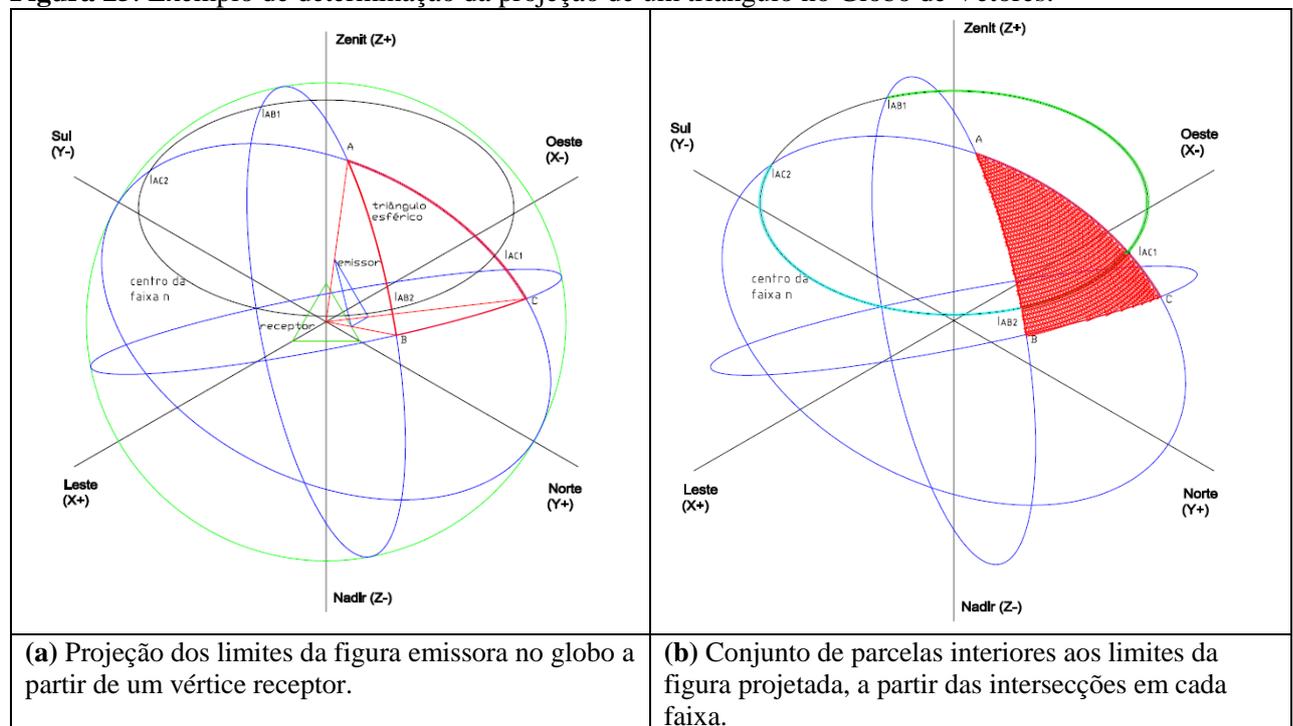


Fonte: Moro (2014)

Cada vértice situado em um plano opaco, transmissor difuso ou de análise é considerado como receptor e colocado no centro do Globo, sendo então os demais planos projetados na superfície do Globo por um método que determina quais são as parcelas que se encontram no limite da projeção do plano. A partir destes limites são obtidas então as parcelas interiores da projeção automaticamente, sem utilizar emissão de raios. Enfatize-se que não constitui um procedimento típico do ray-tracing, já que, definidos os limites da projeção no Globo, todas as parcelas interiores são conhecidas. Para cada direção interceptada pela figura é então anotada a distância em que o vetor central da direção do Globo intercepta o plano projetado.

A Figura 25(a)(b) representa o conceito da projeção utilizando-se 3 circunferências na superfície do globo, passando cada uma em cada aresta de um triângulo projetado e determinando o conjunto de parcelas que representam a projeção:

Figura 25: Exemplo de determinação da projeção de um triângulo no Globo de Vetores.

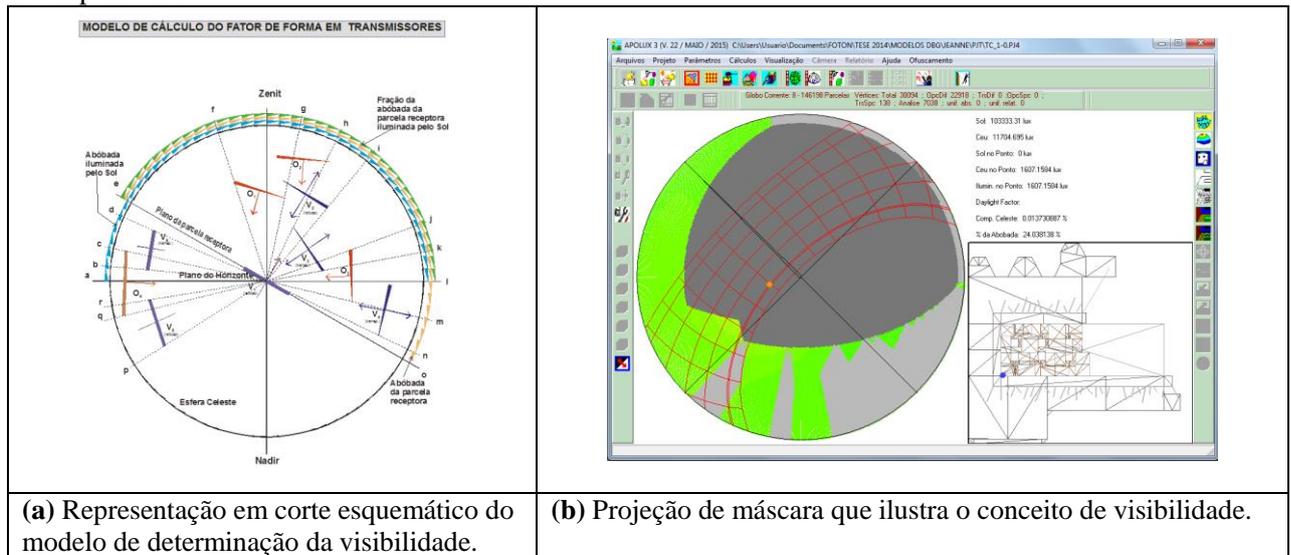


Fonte: Claro (1998)

Nas sucessivas projeções vão sendo comparadas as distâncias de intersecção dos planos que se projetam em uma direção, sendo anotado o que se encontra mais próximo, resultando na prática como que uma Máscara de Visibilidade tirada conforme o plano que contém o vértice receptor, conforme exemplificado na Figura 26 através de um corte representando o esquema de análise da visibilidade **(a)** e o resultado correspondente à Máscara de Visibilidade **(b)**:

A partir desta representação o programa considera as superfícies visualizadas e as direções não obstruídas, todas atenuadas pela transmitância definida pela projeção dos planos transmissores especulares que intermediam o percurso da direção, quando é o caso.

Figura 26: Corte esquemático representando a análise das projeções e a Máscara de Visibilidade correspondente.



Fonte: (a) Claro (1998) ; (b) APOLUX, pelo autor

São computados, separadamente, os Fatores de Forma de cada vértice receptor em relação às superfícies emissoras, através da somatória dos fatores de forma específicos de cada direção contida na projeção, conforme a Fórmula 31:

$$Ftf_{r,e} = \sum_{i=dri}^{drf} Sr_i * \cos(\overline{Nr} \wedge \overline{Dr}_i) * trs_i \quad (31)$$

Onde:

$Ftf_{r,e}$: é o fator de forma do vértice receptor r em relação à parcela emissora e;

Sr_i : é o ângulo esférico contido na direção i do globo (em steradiano)

$(\overline{Nr} \wedge \overline{Dr}_i)$: representa o ângulo formado entre o vetor Normal Nr e o vetor da direção Dri do globo;

dri e drf : indicam a direção inicial e a direção final da lista de direções contidas na projeção;

trs_i : é a transmitância projetada na direção i.

No caso das direções não obstruídas, quando estão acima do horizonte são computadas separadamente, indicando o fator de forma de cada direção visualizada do céu separadamente pela mesma Fórmula 31 usada para o computo dos Fatores de Forma, mas em a integração, mantidos os valores 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 Fórmula 31.

No mesmo procedimento são projetados também os planos de luminárias, considerando sua obstrução na visibilidade, assim como, num passo posterior, a visibilidade do centro fotométrico em relação ao vértice. Caso o centro fotométrico da luminária seja visível, é computado o valor do fator que se aplica ao valor da Intensidade do fluxo da luminária na direção visualizada através da Fórmula 32:

$$Flx_{r,l} = (\cos(\overline{Nr} \wedge \overline{Dr}_l) * trs_l) / dl^2 \quad (32)$$

Onde:

$Flx_{r,l}$: é o fator de fluxo luminoso do vértice receptor r em relação à luminária l;

$(\overline{Nr} \wedge \overline{Dr}_l)$: representa o ângulo formado entre o vetor Normal Nr e o vetor da direção Drl na direção do centro fotométrico da luminária l;

tr_s_i : é a transmitância projetada na direção i

dl^2 : é o quadrado da distância entre o vértice receptor e o centro fotométrico da luminária l , em metros.

3.2 ESTÁGIO ATUAL DA VERSÃO PÚBLICA DO PROGRAMA APOLUX

Na sua versão atual o programa APOLUX apresenta as seguintes capacidades, aqui resumidamente descritas:

1) Importação de Geometria modelada no formato DXF ASCII em diferentes editores gráficos 3D, permitindo a combinação de diferentes arquivos em um novo modelo.

2) Modelagem de protetores solares integrados com a ferramenta de Máscaras de Sombras, propiciadas na fase de tratamento do modelo geométrico para simulação, permitindo no próprio ambiente do programa resolver o projeto de protetores nas geometrias mais comuns. Os protetores, depois de adequadamente projetados, podem ser exportados em DXF para integração no modelo original em CAD.

3) Processamento de Materiais Opacos Difusos, Transmissores Difusos e Transmissores Especulares.

4) Níveis de resolução do Globo de Parcelas que variam de 1.490 a 146.198 direções.

5) Possibilidade de especificar Planos de Análise diversos e em qualquer posição no modelo.

6) Possibilidade de definir Planos de Iluminância Inicial Uniforme, que são considerados como elementos do entorno que contribuem apenas no fluxo inicial de luz no ambiente de interesse e na obstrução da abóbada, não interferindo na equação da radiosidade.

7) Capacidade de realizar simulações estáticas utilizando os 15 modelos de Céu propostos na Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E 2003.

8) Geração de Imagens semi-realistas, gráficos de falsas cores e grades numéricas relativos a Iluminância, Luminância e Daylight Factor – DLF;

9) Vetor Foton, uma projeção esférica a partir de um ponto de observação que permite examinar a configuração luminosa do espaço envolvendo qualquer ponto do ambiente analisado, como se fosse um máscara de sombras móvel manipulável através do mouse.

10) Ferramenta de Projeto de Iluminação Artificial utilizando arquivos fotométricos digitais no formato IES, gerando arquivos DXF com a representação e posicionamento dos elementos gráficos do projeto de iluminação para incorporação ao modelo original no CAD.

11) Incorporação da Norma NBR ISO 8995-1 / 2013 na análise de atendimento a níveis recomendados de iluminância no padrão brasileiro normalizado, gerando planilhas numéricas em texto assim como gráficos de falsas cores.

12) Geração de Máscaras de Sombreamento no formato clássico, correspondente à Máscara de Visibilidade de um ponto num plano horizontal, feita em projeção equidistante.

13) Geração de arquivos numéricos dos resultados em formato de texto estruturado, com praticamente todos os dados de iluminação calculados, permitindo ampla gama de pós-processamento. Inclui também as especificações e cálculos de potência do conjunto de luminárias projetado.

É importante salientar que no MVE, conforme implementado atualmente no Apolux, a equação da Radiosidade é aplicada plenamente, ou seja, todo vértice que é visualizado por outro ou visualiza algum outro participa da aplicação dos ciclos de inter-reflexões. Não há recursos de simplificação ou aplicação de técnicas estatísticas para simplificar ou acelerar o cálculo. Saliente-se também que o fato de não terem sido aplicadas tais técnicas não significa que não sejam possíveis, mas isto não será objeto deste trabalho especificamente.

Saliente-se finalmente que os conceitos adicionais que serão apresentados neste trabalho não constituem ferramentas incorporadas à versão atual disponível, sendo frutos do estágio atual do projeto apoiado pela Eletrobrás S.A., conforme colocado inicialmente.

3.3 PROCEDIMENTOS DE VALIDAÇÃO DO PROGRAMA APOLUX

O programa Apolux já foi usado em uma ampla gama de pesquisas acadêmicas, consultorias, dissertações de mestrado, teses de doutorado, além de servir de ferramenta didática em disciplinas de vários cursos de arquitetura e urbanismo no Brasil.

Dos trabalhos realizados, 4 deles são relacionados à validação dos procedimentos de cálculo do método, sendo que um deles, realizado por Pereira (2009) utiliza mapeamento digital por fotografia de alta resolução e medições em ambiente real e em maquete para comparação de resultados obtidos com simulação no modelo virtual correspondente. Os trabalhos de Carvalho (2009), Cunha (2011) e Moraes et alii (2013), utilizaram protocolos de validação descritos no Relatório CIE 171:2006 (CIE, 2006) para validar os algoritmos de cálculo de fatores de forma, fluxos de troca, modelos de céu da norma ISO 15469:2003(E) CIE S 011/E:2003 (CIE, 2004) e cálculo de luz artificial com arquivos fotométricos.

Neste tópico descreveremos para cada um deles os principais conceitos e resultados obtidos.

3.3.1 Avaliação Através do Mapeamento Digital de Luminâncias.

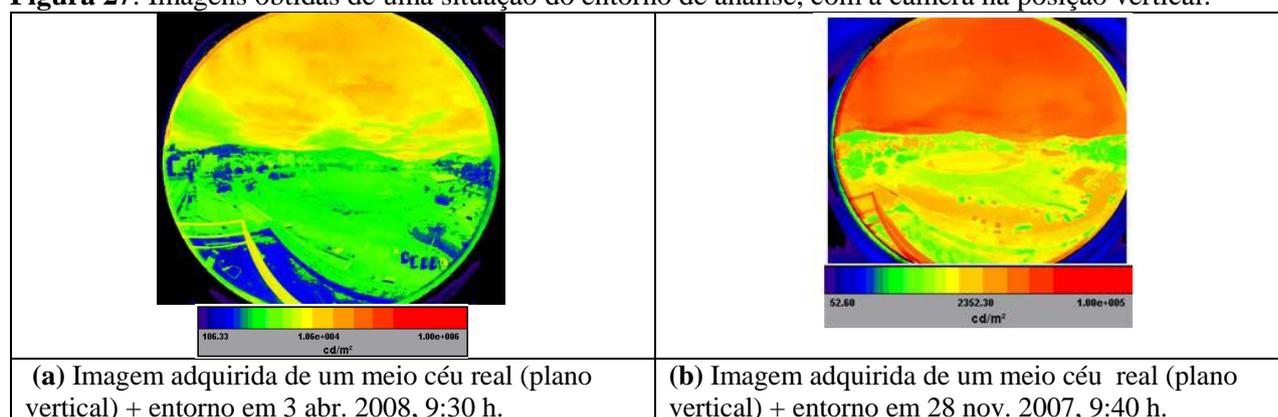
No trabalho de Pereira, Pereira e Claro (2011) é apresentada uma síntese de sua tese de doutorado (PEREIRA 2009), objetivando descrever um processo metodológico para avaliar o desempenho da ferramenta computacional de simulação de iluminação natural em céu real e entorno natural e edificado.

O método compreende a utilização de fotografia de alta resolução para mapear luminâncias celestes e das superfícies dos ambientes. Este mapeamento é utilizado como fonte de dados de verificação real de um modelo, servindo como parâmetro de referência para aferição de resultados da simulação utilizando um modelo virtual análogo ao ambiente mapeado digitalmente.

O método segue as seguintes etapas: a) caracterização da distribuição de luminâncias da fonte utilizando os recursos da fotografia digital; b) realização da medição experimental com os sensores fotoelétricos simultaneamente no ambiente real e em uma maquete em escala do ambiente com as mesmas características e sob mesmas condições de iluminação; c) desenvolvimento da simulação computacional com os dados de luminâncias obtidos através do mapeamento digital; d) análise comparativa das iluminâncias simuladas no interior do modelo digital com as medidas no ambiente real e na maquete, e validação da ferramenta de simulação computacional submetida ao processo metodológico.

A câmera digital utilizada neste trabalho é denominada **IQCam Imaging Photometer - 300**, e foi empregada como instrumento fotométrico para o mapeamento digital de luminâncias. O equipamento apresenta uma lente olho de peixe com abertura angular de aproximadamente 186 graus e permite, através do cenário digitalizado, identificar a distribuição de luminâncias em cd/m^2 para cada *pixel* da imagem, como mostrado na Figura 27.

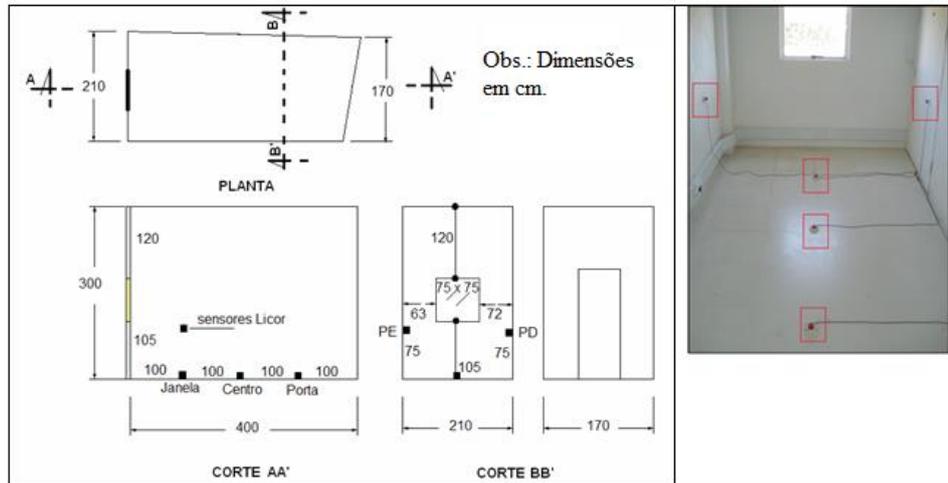
Figura 27: Imagens obtidas de uma situação do entorno de análise, com a câmera na posição vertical.



Fonte: Pereira (2011)

O ambiente de referência utilizado foi uma sala do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC, pintada com tintas de refletância conhecida, na qual foram colocados 5 sensores fotoelétricos, conforme indicado na Figura 28:

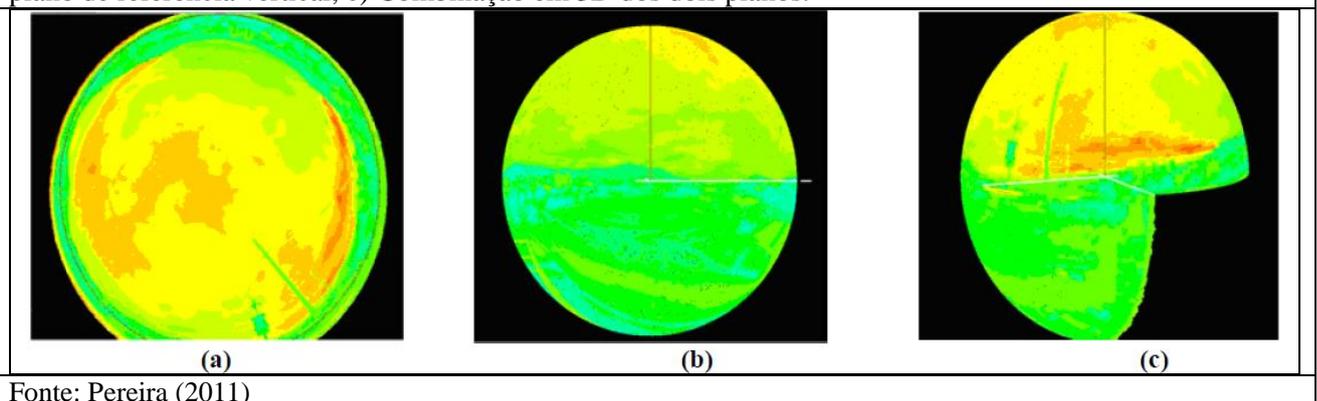
Figura 28: Ambiente estudado no Departamento de Arquitetura e Urbanismo – UFSC, com especificações do projeto e imagem do ambiente.



Fonte: Pereira (2011).

A maquete em escala 1:10 pintada com as mesmas tintas foi posicionada no ambiente ao lado, na janela com igual posição à janela do ambiente estudado. As imagens capturadas pela câmera foram tomadas em um plano horizontal na laje de cobertura sobre o ambiente (abóbada) e no plano vertical da janela, para registrar o entorno. Os dados de luminância foram transferidos através de arquivos numéricos para o programa Apolux, numa rotina desenvolvida especificamente para a tese²³, conforme representado na Figura 29:

Figura 29: Imagens importadas no Apolux originadas na IQC-Cam, mostrando a distribuição da luminância em um céu real em 13 mar. 2008, 14h: a) Abóbada celeste – plano de referência horizontal; b) Entorno – plano de referência vertical; c) Combinação em 3D dos dois planos.

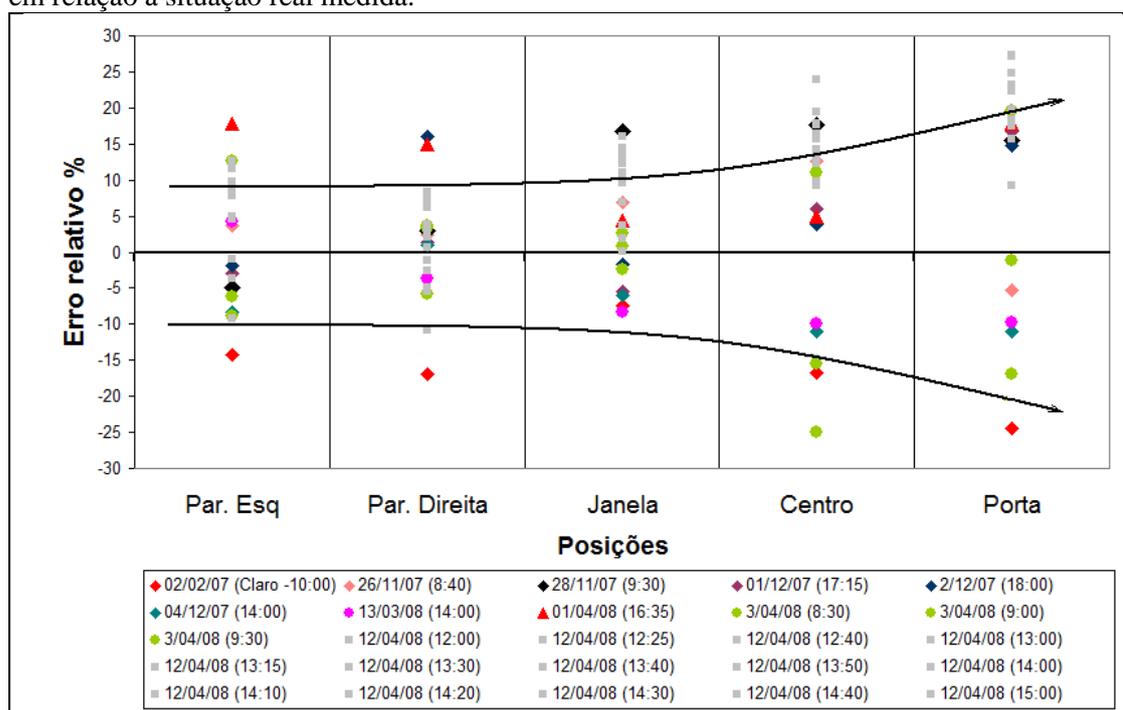


Fonte: Pereira (2011)

Foram analisadas vinte e cinco tomadas de dados nos cinco pontos de análise, resultando 125 simulações computacionais de iluminâncias na ferramenta computacional APOLUX. Os desvios dos resultados simulados em relação às medições nos sensores estão sintetizados na Figura 30:

²³ Estas rotinas não estão disponíveis na versão pública atual do programa, pois envolvem a câmera IQC, que praticamente não está disponível no Brasil.

Figura 30: Gráfico com os desvios de resultados simulados no programa Apolux em relação à situação real medida.



Fonte: Pereira, Pereira e Claro (2011)

Segundo o estudo:

“Mardaljevic (2000)²⁴ verificou no programa validado Radiance uma frequência de ocorrência de 64% para as discrepâncias até 10%. No APOLUX, foi observada uma frequência de ocorrência de 54,4% para os erros relativos até 10%. No intervalo entre 10% e 25%, ocorreu uma frequência de ocorrência de 34% no Radiance e 43,2% no Apolux. Pode-se dizer que, das 125 simulações ocorridas no Apolux, 97,6% apresentaram discrepâncias de até 25% e somente 2,4% ficaram acima desse valor, porém todas inferiores a 50%. No simulador computacional Radiance, 2% das ocorrências resultaram discrepâncias acima de 50%.”(PEREIRA; PEREIRA; CLARO, 2011, p. 10):

3.3.2 Validação dos Procedimentos de Cálculos dos Fatores de Forma e Fluxos de Inter-Reflexão

O trabalho realizado por Carvalho (2009) envolveu a utilização de protocolos do Relatório CIE 171:2006 (CIE, 2006), publicação que propôs um grande conjunto de protocolos de testes para simuladores de iluminação. Este relatório é constituído por diferentes seções, que envolvem testes relacionados a Fatores de Forma, Fluxo de Troca, Iluminação por Luminárias, Modelos de Céu, entre os principais.

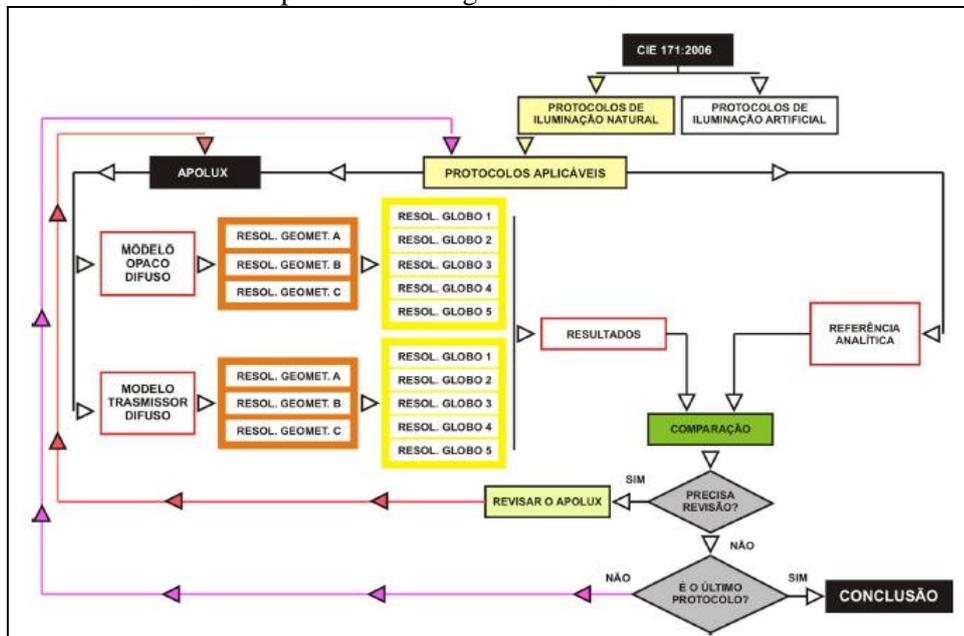
²⁴ Referência ao trabalho que é considerado a primeira e principal validação do Radiance: MARDALJEVIC, J. (2000). **The BRE-IDMP dataset: a new benchmark for the validation of illuminance prediction techniques**. Institute of Energy and Sustainable Development (IESD), De Montfort University, Leicester LE7 9SU, UK. November.

Dentro do Relatório Técnico da CIE 171:2006 são apresentados diversos protocolos, cada um com um objetivo. O documento é dividido em duas partes principais, apresentando os estudos de caso (CARVALHO,2009).

A primeira é intitulada-se **Propostas Experimentais de Estudos de Caso**, contendo uma lista com seis diferentes estudos de caso para a análise da iluminação artificial (Protocolos 4.1 a 4.6). A segunda parte destina-se a **Estudos de Caso Propostos com Referências Analíticas**, que lista treze estudos relacionados com iluminação de forma geral (Protocolos 5.2 a 5.14).

Carvalho (2009) restringiu-se, neste primeiro trabalho a parte dos algoritmos relacionados na segunda parte do documento, de testes analíticos envolvendo: fatores de forma, fluxo de troca, refletâncias e obstruções, no âmbito da iluminação natural. O esquema metodológico, que envolve diferentes níveis de resolução geométrica dos modelos (número de vértices) e do globo de vetores (número de direções), está representado na Figura 31:

Figura 31: Esquema metodológico de verificação dos protocolos de testes do Relatório CIE 171 aplicados ao Programa APOLUX.



Fonte: Carvalho (2009)

Foram estudados os seguintes protocolos, conforme os modelos apresentados na Figura 32:

a) Protocolo 5.3: Este estudo de caso foi desmembrado em quatro partes e aplicado a fim de avaliar o fator de forma da simulação.

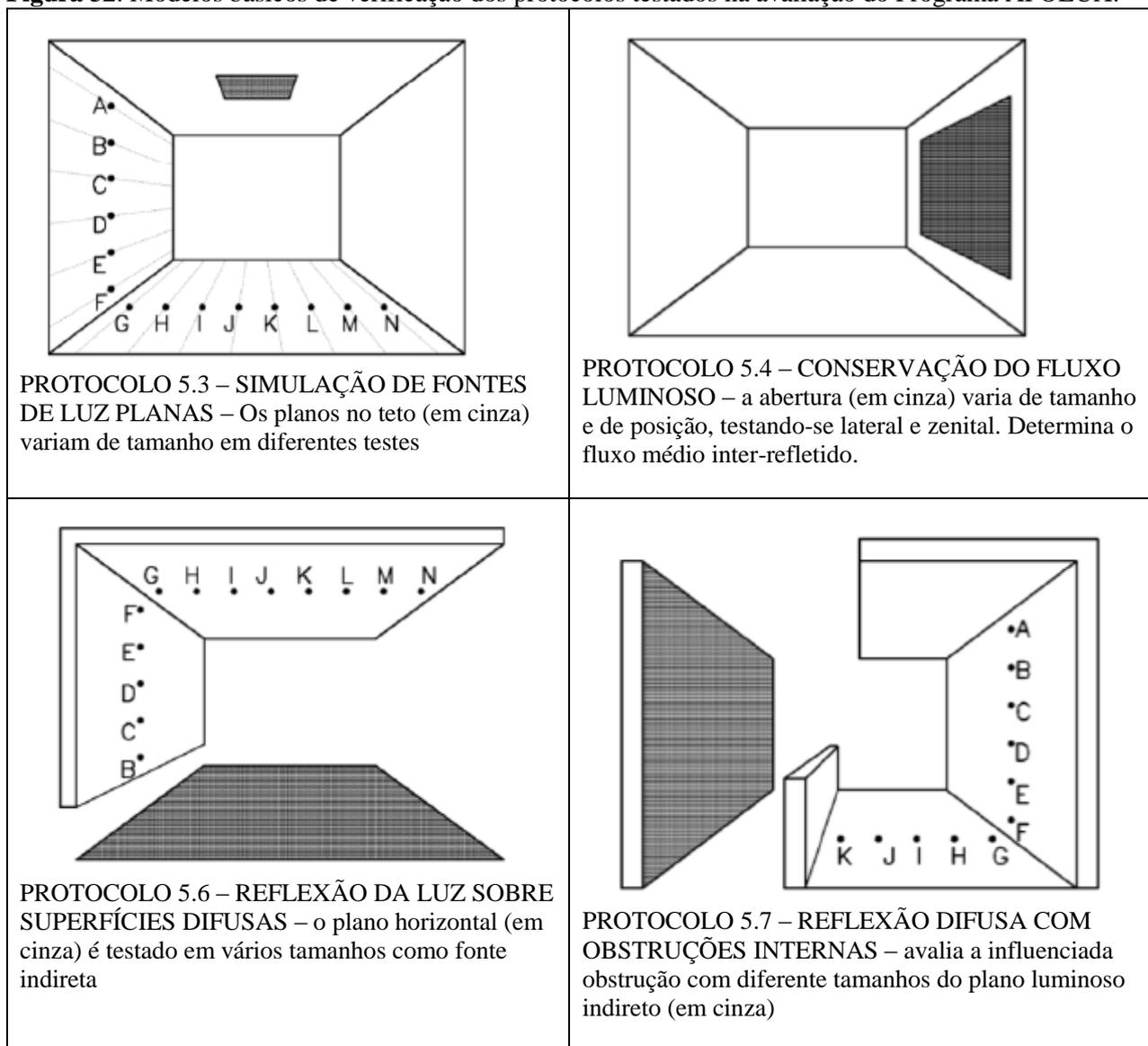
b) Protocolo 5.4: Foi aplicado visando avaliar a conversação do fluxo luminoso. Para esta análise a geometria variou com setes aberturas distintas.

c) Protocolo 5.6: Foi aplicado visando avaliar a influência de piso externo. Foi analisando sob três geometrias distintas, avaliando o fator de forma.

d) Protocolo 5.7: Foi aplicado visando avaliar a simulação com geometria complexa e influência de obstruções de sombras internas, avaliando o fator de forma da simulação.

A faixa limite estabelecida na metodologia, com valores de erro entre -5% e 5%, foi utilizada para mensurar a frequência dos valores apresentados nas simulações.

Figura 32: Modelos básicos de verificação dos protocolos testados na avaliação do Programa APOLUX.



Fonte: Carvalho (2009)

Resumidamente, a frequência dos erros calculados para Fator de Forma com globo de 5.902 direções (menor resolução de visibilidade) mostrou que cerca de **70%** dos valores calculados encontra-se com erros entre -10% e 2%; aproximadamente **22%** apresentam erros entre 2% e 13%.

A frequência de erro para Fator de Forma com globo de 23.450 direções, mostrou que cerca de **36%** dos valores calculados encontra-se com erros entre -4,5% e 0%; cerca de **54%** apresentam erros entre 0% e 4,5%. Desta forma, **90%** dos erros calculados encontram-se dentro da faixa limite estabelecida na metodologia, com valores entre -5% e 5%.

A frequência de erro para Fator de Forma com globo de 52.670 direções, mostrou que cerca de **95%** dos valores calculados encontra-se com erros entre -3% e 3%, dentro da faixa limite estabelecida na metodologia, com valores entre -5% e 5%.

A frequência de erro para Fator de Forma simulado com globo de 146.198 direções (maior resolução de visibilidade), mostrou que cerca de **82%** apresentam erros menores que 1%. Dentre os 109 valores de erros calculados para fator de forma para a relação entre planos paralelos e perpendiculares utilizados nos protocolos 5.3, 5.5 e 5.6, 100% dos resultados apresentaram-se com erros entre -5% e 5%.

Para avaliação do Fator de Forma, **86,8%** dos resultados apresentaram-se confiáveis (independente da resolução de visibilidade escolhida); e para a avaliação da conservação do fluxo luminoso (independente do fracionamento da geometria, da resolução de visibilidade e condição de céu) **77%** dos resultados apresentaram-se confiáveis.

Carvalho (2009) demonstrou inclusive uma situação muito peculiar, que denominou **erro de pulso**, provando que os erros inerentes às diferentes resoluções de visibilidade do globo não são necessariamente proporcionais a essas resoluções. Em outras palavras, é possível que para um determinado ponto de um projeto a visibilidade apresente menor erro numa menor resolução que quando projetada na visibilidade de maior resolução. No entanto esta situação ocorre muito especificamente para alguns pontos e não compromete a regra geral de maior precisão com maior resolução de visibilidade.

3.3.3 Validação dos Procedimentos de Cálculos dos Modelos de Céu.

O trabalho de Cunha (2011) retoma o Relatório 171 CIE (CIE, 2006) no que toca principalmente à verificação dos modelos de céu caracterizados na Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E 2003. Foram aplicados os seguintes protocolos:

a) Protocolo 5.8: Avaliação de Componente Refletida Interna calculada para superfícies difusas.

b) Protocolo 5.9: Avaliação da Componente Celeste.

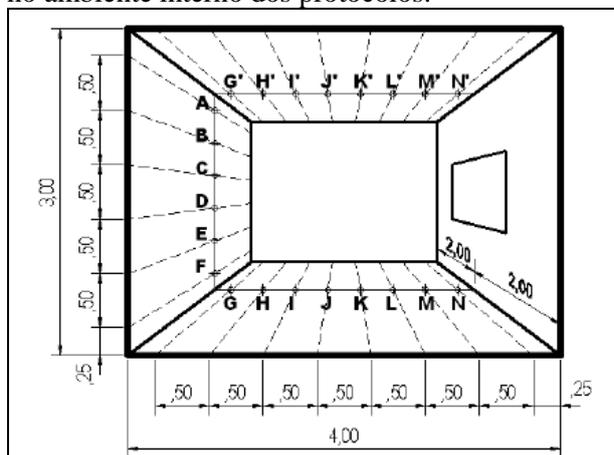
c) Protocolo 5.11: Avaliação da Componente Celeste e Componente Refletida Externa.

d) Protocolo 5.13: Avaliação da Componente Celeste e Componente Refletida Externa com máscara horizontal externa contínua.

e) Protocolo 5.14: Avaliação da Componente Celeste e Componente Refletida Externa com máscara vertical externa contínua.

A metodologia seguida por Cunha (2011) foi muito similar à de Carvalho (2009), considerando-se entretanto que as simulações foram feitas para cada um dos 15 modelos de céu normalizados, implicando num número de simulações significativamente maiores. Na Figura 33 temos o modelo básico dos pontos interiores utilizado na avaliação dos diferentes protocolos.

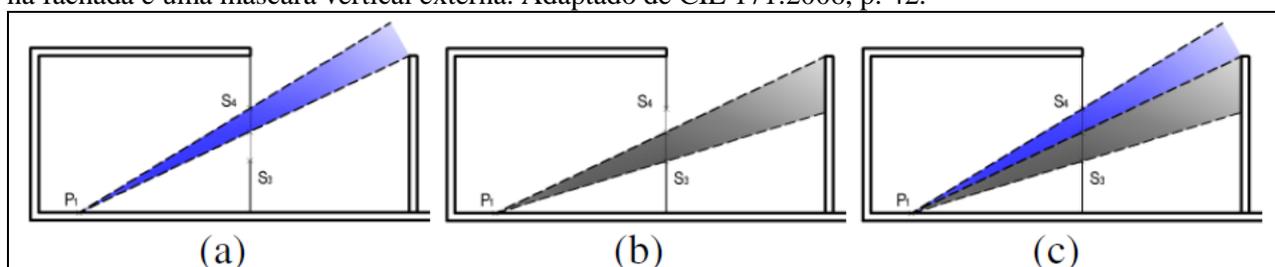
Figura 33: Descrição da geometria e localização dos pontos de medição no ambiente interno dos protocolos.



Fonte: Cunha (2011)

A avaliação das condições externas varia nos diferentes protocolos, desde sem obstruções, passando por obstruções horizontais superiores (platibanda) e obstruções verticais frontais, esta última mostrada na Figura 34 como exemplo.

Figura 34: Cálculo da Componente Celeste (a) e da Componente Refletida Externa (b) para uma abertura na fachada e uma máscara vertical externa. Adaptado de CIE 171:2006, p. 42.



Fonte: Cunha (2011)

A Tabela 14 mostra, para efeito de contabilização, a quantidade total de ocorrências (resultados em um ponto) ocorrências válidas e descartadas por erros indicando em que globo, qual ponto e em que céu ocorreram, através da compilação dos resultados dos protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14. As ocorrências descartadas são aquelas que são equívocos (devidamente demonstrados por Cunha (2011) no seu trabalho) do Relatório Técnico CIE 171:200 em que não houve a possibilidade de correção:

Tabela 14: Mapa de Resultados dos protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14 indicando o número de simulações realizadas e os descartes.

		Descartadas	Válidas	Total	Globo	Ponto(s)	Céu
5.9	AZ 1x1	0	672	672	-	-	-
	AZ 4x4	3	666	672	60, 90 e 150	A	1
		3			60, 90 e 150	G	13
5.11	AL 2x1	0	1056	1056	-	-	-
	AL 4x3	0	1056	1056	-	-	-
5.13	MH 0,50	0	256	256	-	-	-
	MH 1,00	16	240	256	60 e 90	A - H	16
	MH 2,00	0	256	256	-	-	-
5.14	MV 3,00	0	256	256	-	-	-
	MV 6,00	64	192	256	60 e 90	A e B	1 - 16
	MV 9,00	128	126	256	60 e 90	A - D	1 - 16
		2				F	12
Total		216	4776	4992			
%		4.33	95.67	100.00			

Fonte: Cunha (2011)

Os resultados propriamente dito, em termos de percentuais dentro das faixas de erro estabelecidas como referência no estudo estão sintetizadas na Tabela 15²⁵:

²⁵ No trabalho completo de Cunha (2011) há inúmeras tabelas demonstrando detalhadamente o resultado de cada simulação em cada ponto para cada céu.

Tabela 15: Resumo dos resultados percentuais com as ocorrências válidas para os protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14.

	Globo 60		Globo 90		Globo 150		TOTAL	
	Ocor.	%	Ocor.	%	Ocor.	%	Ocor.	%
Até 1,00%	1167	64.37	1364	75.23	1037	90.17	3568	74.71
De 1,01% até 5,00%	576	31.77	414	22.84	111	9.65	1101	23.05
De 5,01% até 10,00%	38	2.10	19	1.05	2	0.17	59	1.24
Maior que 10,01%	32	1.77	16	0.88	0	0.00	48	1.00
Total Válido	1813	100	1813	100	1150	100	4776	100

Fonte: Cunha (2011)

3.3.4 Avaliação dos Protocolos do Relatório CIE 171 Relativos a Iluminação Artificial.

O trabalho de Moraes et ali (2013) utiliza os protocolos do Relatório CIE 171 (CIE, 2006) aplicáveis a iluminação artificial, comparando com os dados do protocolo não apenas o programa Apolux, como também os programas Relux e Dialux nas versões livres disponíveis à época, além do programa LightTool²⁶ que utiliza simplificadaamente os mesmos algoritmos que o Apolux. Também foram testados dois outros protocolos relacionados a fontes pontuais e inter-reflexão. São eles:

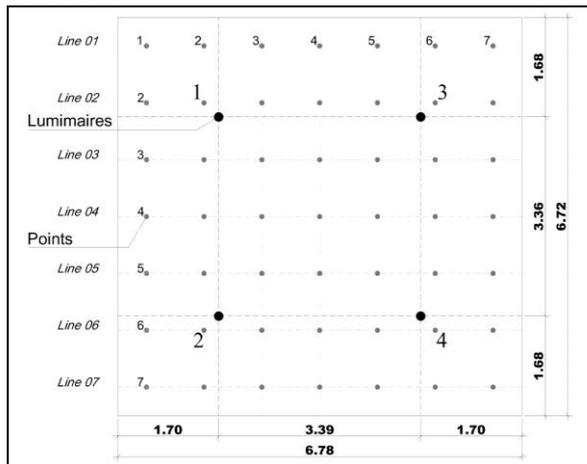
- a) **Protocolo 4.1:** Cenário de Iluminação Artificial – CFL, parede cinza;
- b) **Protocolo 4.2:** Cenário de Iluminação Artificial – Luminária Opal, parede cinza;
- c) **Protocolo 4.3:** Cenário de Iluminação Artificial – Luminária de refletor semi-especular, parede cinza;
- d) **Protocolo 4.4:** Cenário de Iluminação Artificial – CFL, parede preta;
- e) **Protocolo 4.5:** Cenário de Iluminação Artificial – luminária Opal, parede preta;
- f) **Protocolo 4.6:** Cenário de Iluminação Artificial – Luminária de refletor semi-especular, parede preta.
- g) **Protocolo 5.2:** Este estudo de caso que apresenta para a análise fonte de luz pontual.
- h) **Protocolo 5.8:** Componente Refletida Interna Calculada para Superfícies Difusas, protocolo que avalia inter-reflexões, permitindo avaliar a aplicação da equação da radiosidade;

Os protocolos são aplicados em um ambiente único, conforme mostrado na Figura 35, sendo que os valores de referência foram obtidos em procedimentos de medição em ambiente real, sendo fornecidos os dados do ambiente e as fotometrias das luminárias utilizadas.

Na Figura 36 são apresentados os resultados obtidos na aplicação dos protocolos 4.1 a 4.6 para uma das linhas de pontos de referência, sendo que os resultados de todas as linhas analisadas foram bastante similares:

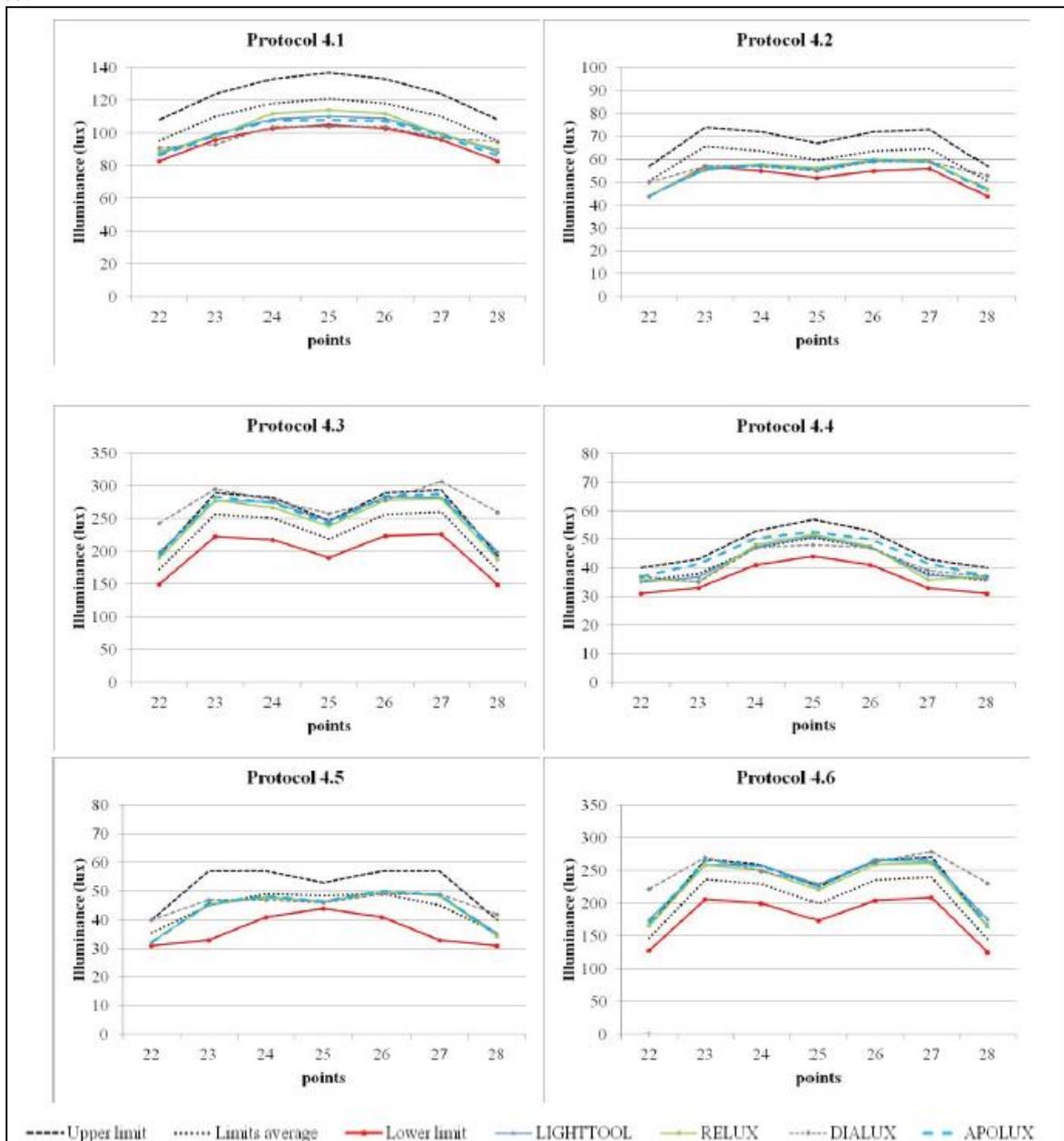
²⁶ O programa Light Tool não tem sido atualizado, já que o Apolux incorporou todos os algoritmos de luz artificial, inicialmente só contidos no Light Tool. A partir do trabalho de Moraes et ali (2013), somente o Apolux tem sido implementado e atualizado.

Figura 35: Esquema de distribuição de luminárias e de pontos de avaliação indicados no Relatório CIE para os protocolos de iluminação artificial.



Fonte: Moraes, Sobreira e Claro (2013)

Figura 36: Resultados da comparação entre os valores de iluminância obtidos para uma linha dos pontos de análise.



Fonte: Moraes, Sobreira e Claro (2013).

O protocolo 5.2, de fonte pontual, foi analisado segundo uma fonte com fotometria homogênea difusa outra com fotometria assimétrica. Este protocolo foi aplicado somente aos programas Apolux e Light Tool. Os resultados estão mostrados na Tabela 16 para as duas fotometrias.

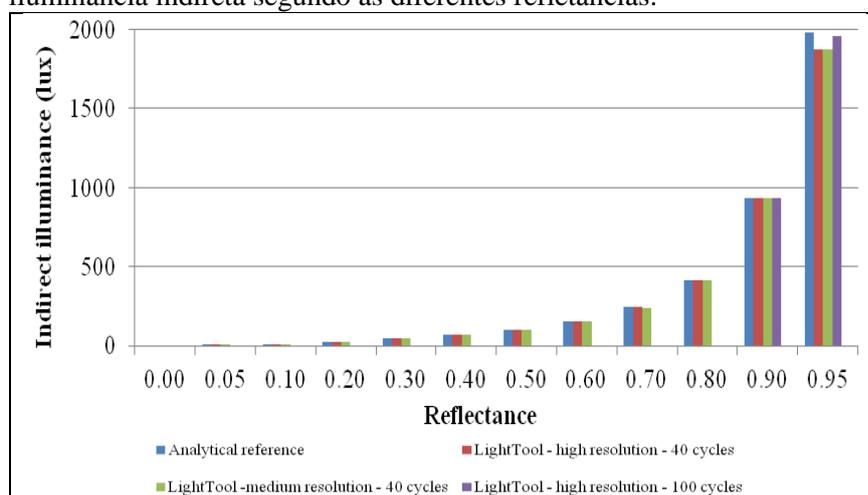
Tabela 16: Iluminâncias calculadas pelo método analítico do Relatório CIE 171 pelos Programas APOLUX e LightTool, indicando os desvios dos resultados em relação às referências do protocolo (%).

Points	Diffuse Photometry					Asymmetric Photometry				
	CIE E (lx)	LightTool E (lx) Deviation		APOLUX E (lx) Deviation		CIE E (lx)	LightTool E (lx) Deviation		APOLUX E (lx) Deviation	
A	111.11	111.11	0.0%	111.11	0.0%	111.11	111.11	0.0%	111.11	0.0%
B	105.21	105.28	-0.1%	105.12	0.1%	122.25	121.34	0.7%	122.44	-0.2%
C	90.02	90.21	-0.2%	89.87	0.2%	124.08	123.84	0.2%	124.32	-0.2%
D	71.11	70.92	0.3%	71.21	-0.1%	117.31	117	0.3%	116.65	0.6%
E	99.73	99.59	0.1%	99.678	0.1%	113.65	113.86	-0.2%	113.56	0.1%
F	85.64	85.4	0.3%	85.7	-0.1%	113.41	113.38	0.0%	113.33	0.1%
G	68.06	67.69	0.5%	68.1	-0.1%	102.74	102.89	-0.1%	102.18	0.5%
H	74.36	74.33	0.0%	74.45	-0.1%	91.57	91.2	0.4%	92	-0.5%
I	59.98	59.78	0.3%	59.87	0.2%	81.65	81.82	-0.2%	81.74	-0.1%
J	49.39	49.09	0.6%	49.36	0.1%	62.16	61.64	0.8%	62.18	0.0%

Fonte: Moraes, Sobreira e Claro (2013).

O Protocolo 5.8, por uma questão prática da pesquisa, foi aplicado somente ao programa Light Tool, já que utiliza o mesmo algoritmo que o Apolux, um pouco mais simplificado, considerando-se que sua precisão é igual ou inferior à do Apolux. O protocolo é aplicado em um ambiente cúbico de refletância uniforme variável, com resultados semelhantes a uma Esfera de Ulbricht, com uma fonte difusa pontual colocada no centro do ambiente. A refletância varia de 0% a 95%. Os resultados estão sintetizados na Figura 37:

Figura 37: Resultados da comparação para os valores médios de iluminância indireta segundo as diferentes refletâncias.



Fonte: Moraes, Sobreira e Claro (2013).

3.3.5 Avaliações Indiretas da Disponibilidade Anual de Luz Natural Utilizando o Programa APOLUX

Os algoritmos do Modelo Vetorial Esférico já foram usados em 3 trabalhos voltados à avaliação da disponibilidade de luz natural ao longo do tempo de forma indireta, simplificada, alternativa à Dynamic Daylight Simulation – DDS feitas com descrições anuais propiciadas pelos arquivos climáticos.

O trabalho de Souza (2003) utilizou os algoritmos do Modelo Vetorial Esférico para estimar, segundo sua denominação, a Disponibilidade Potencial de Luz Natural através de probabilidade estatística de ocorrência de tipo de céu, utilizando os 3 modelos tradicionais de padrão de céu (limpo, parcialmente encoberto e encoberto) adotados pela CIE antes da atual Norma, a ISO 15469-2004 (E)CIE S 011-E. Este trabalho não utilizou os arquivos climáticos, realizando uma sucessão de simulações estáticas em datas e horas específicas ao longo do ano, repetidas para céus limpo, encoberto e parcialmente encoberto (padrão CIE à época), ponderando os resultados de iluminâncias através das estatísticas de ocorrência de cada tipo de céu em Florianópolis, seu estudo de caso. Foram simuladas diferentes geometrias de ambientes retangulares e de ocorrência de aberturas. O trabalho adotou o conceito de Disponibilidade Potencial de Luz Natural – DPLN, como sendo a porcentagem de tempo que um ambiente dispõe de luz acima de um valor de referência, considerando a distribuição superficial em um plano de trabalho, segundo um zoneamento interno baseado na iluminância média ponderada das zonas a partir dos valores de cada ponto avaliado contido na zona.

O trabalho de Moraes e Pereira (2011) *“... busca uma metodologia alternativa para avaliação da iluminação natural através de um procedimento simplificado para obtenção de métricas dinâmicas de desempenho - Daylight autonomy (DA) e Useful daylight illuminances (UDI). O método proposto é baseado na relação entre a iluminância interna e a externa, cuja definição é o Daylight Factor, e pela frequência de ocorrência com que as iluminâncias externas ocorrem ao longo do ano.”* (MORAES; PEREIRA, 2011, p. 1)

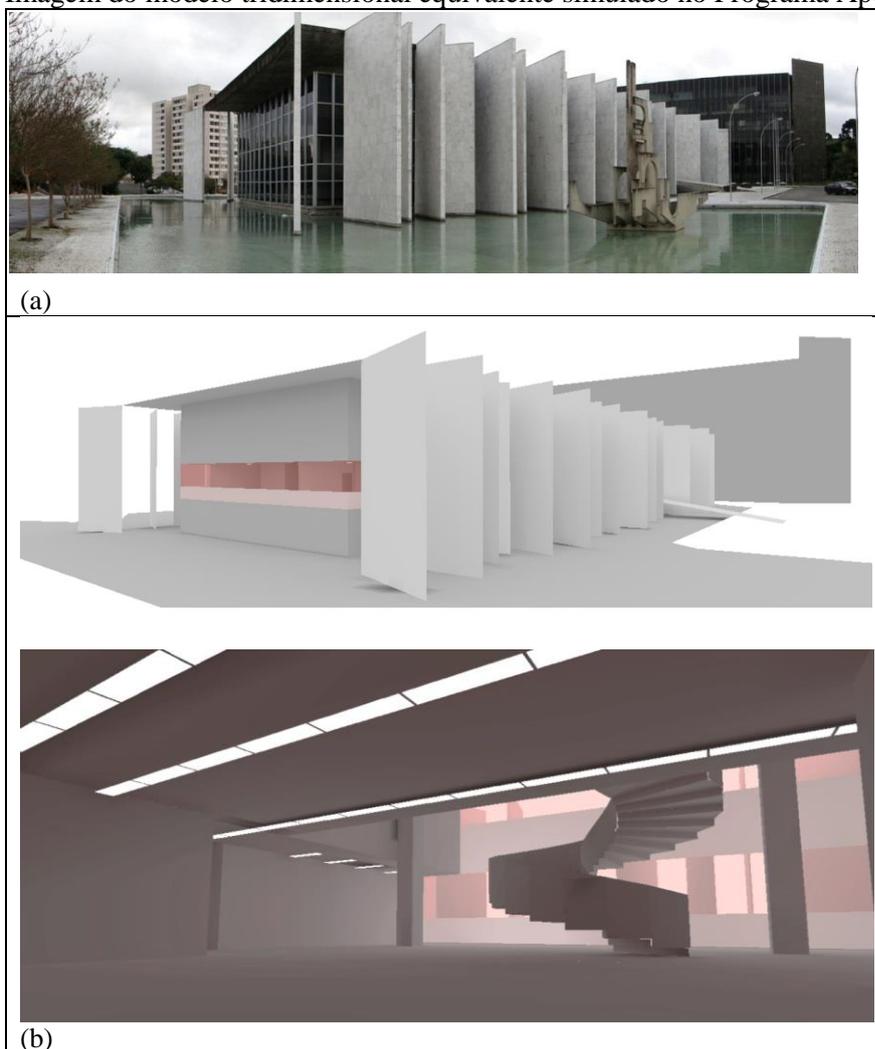
Neste trabalho é utilizado o Programa LightTool, que fundamenta-se também nos algoritmos do MVE, para a determinação do DLF como parte do método. Segundo os autores os resultados *“...sugerem que o método alternativo proposto torna-se "viável", podendo ser utilizado por projetistas de edificações, que poderão encontrar informações relevantes o suficiente para decisões de projeto baseadas na luz natural, desde que sejam capazes de interpretar e avaliar os resultados. O método simplificado também é uma ferramenta atraente para demonstrar o desempenho da luz natural para profissionais que não possuem conhecimento a respeito de simulação dinâmica, uma vez que permite uma avaliação do fenômeno no decorrer do processo de projeto.”* (MORAES; PEREIRA, 2011, p. 10)

O trabalho de Pinto (2014) utiliza o Programa APOLUX para fazer uma avaliação do Tribunal de Contas do Estado do Paraná, em Curitiba – PR quanto à situação de iluminação artificial existente e novas propostas de projeto de iluminação, utilizando também o método apresentado por Moraes e Pereira (2011). Foram analisados 3 pavimentos de todo o corpo principal do prédio e utilizados todos os recursos de tratamento de materiais, inclusive com o efeito solo, planos uniformes na modelagem do anexo como entorno. Os projetos de iluminação artificial para estudo de retrofit também utilizaram o APOLUX nos recursos de cálculo com arquivos fotométricos assim como para a determinação dos níveis de potência elétrica projetados para avaliação. Ainda foram utilizados os recursos de Máscaras de Sombreamento para o estudo das superfícies das janelas em relação ao desempenho dos protetores solares do projeto, objetivando

associar esta análise com os níveis de disponibilidade de luz propiciado pelo método simplificado do DLF na identificação das possibilidades de iluminação excessiva pela penetração de luz solar direta.

A Figura 38 mostra uma foto do edifício modelado e uma imagem do modelo tridimensional produzido para a simulação, observando que o interior dos 3 pavimentos foi também modelado. O processamento, no entanto, usou o recurso de dividir o modelo em partes, sendo construídos 6 modelos, cada um contendo o exterior e metade de um dos 3 pavimentos. Ao final da simulação, as imagens de cada meio pavimento foram juntadas para os gráficos finais, com excelentes resultados na redução do tempo de simulação e capacidade de lidar com a complexidade dos modelos. Simulações iniciais mostraram a praticidade da abordagem frente a uma simulação do edifício como um todo.

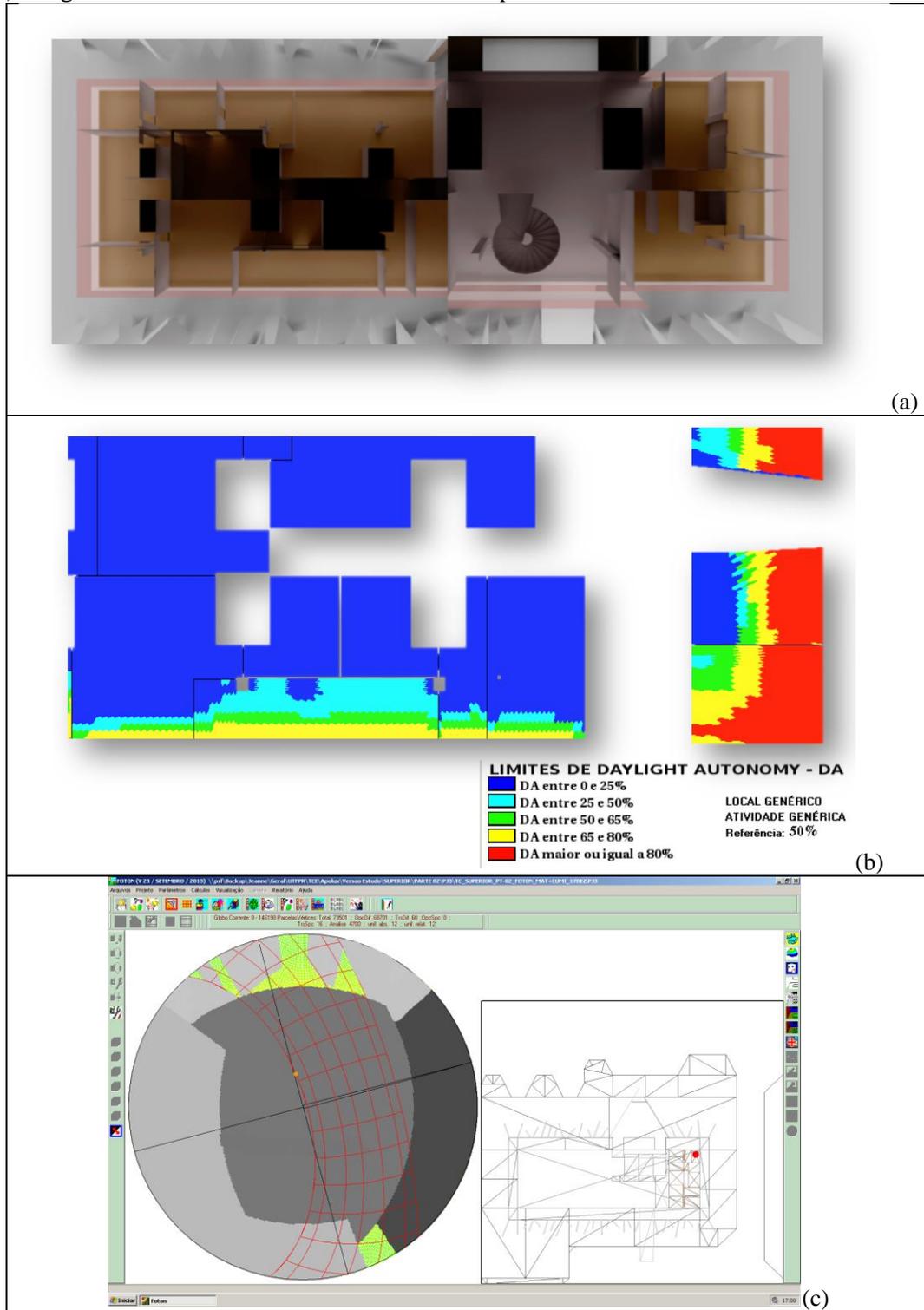
Figura 38: (a) Edifício Tribunal de Contas do Estado do Paraná, em Curitiba-PR.
(b) Imagem do modelo tridimensional equivalente simulado no Programa Apolux



Fonte: Pinto (2014)

Na Figura 39 estão mostrados os resultados relativos a: (a) Simulação de Iluminação Natural no piso Térreo; (b) determinação do Daylight Autonomy – DA obtido a partir do DLF e do gráfico de ocorrência de iluminâncias externas conforme o método de Moraes e Pereira (2011) (planos de análise sem considerar hall da escada); (c) Máscara de Sombras obtidas em um ponto na janela da fachada.

Figura 39: (a) Imagem da simulação de luz natural no piso térreo.
 (b) Gráfico Daylight Autonomy – DA obtido a partir do DLF e do gráfico de ocorrência de iluminâncias externas.
 (c) Imagens do Mascaramento de Sombras de um ponto na fachada do modelo tridimensional.



Fonte: Pinto (2014)

3.4 ESTRUTURA DOS DADOS DE VISIBILIDADE GERADOS NO APOLUX

Considerando que o procedimento de determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN é feito basicamente a partir dos arquivos de visibilidade calculados no Apolux, vamos detalhar mais a estrutura destes dados para melhor compreensão das propostas metodológicas.

O procedimento de cálculo da Visibilidade no MVE consiste praticamente em determinar uma máscara para cada um dos vértices de superfícies físicas do projeto caracterizadas como Planos Opacos Difusos, Transmissores Difusos e Análise considerando-os como receptores. Os planos de luminância uniformes e os planos correspondentes ao corpo das luminárias não são considerados como receptores. Esta máscara, que não é tomada no plano horizontal que passa pelo ponto, e sim definida pelo plano que contém o vértice na intersecção com o globo de vetores, permite identificar para cada vértice todas as direções do globo desobstruídas ou que estejam sendo visualizadas através de superfícies transmissoras especulares, registrando-se para estas direções a atenuação provocada pela transmitância de cada plano ao longo da direção, cumulativamente. Para os planos transmissores difusos são feitas duas máscaras, uma para cada hemisfério de visibilidade determinado pelo plano. Os planos opacos são projetados com apenas um hemisfério de visibilidade. Os planos transmissores especulares não são considerados como receptores, e são projetados como atenuantes do fluxo em uma direção, considerando-se sua transmitância.

A partir destas projeções são criados dois arquivos de coeficientes:

I) Arquivos de céu: são ordenados segundo os vértices, sendo que para cada vértice é anotado:

a) Número de direções do céu visíveis do vértice, seguindo-se uma lista com o índice das direções visíveis e o Fator de Forma correspondente a ela, atenuado pela transmitância dos planos especulares transparentes interpostos em cada direção.

b) Número de Planos Uniformes visualizados, seguindo-se uma lista dos índices dos planos visualizados e os Fatores de Forma correspondentes, atenuados pela transmitância nas direções que descrevem cada plano, tomadas no conjunto da integração de cada direção para obtenção dos Fatores de Forma.

c) Efeito solo: corresponde ao Fator de Forma das direções desobstruídas que dirigem-se para abaixo da linha do horizonte. A hipótese é que se uma direção não está obstruída por qualquer tipo de plano, se dirigir-se acima do horizonte encontra o céu; se dirigir-se abaixo, encontra o solo. A luminância do solo é posteriormente definida segundo o tipo de céu e a refletância média estipulada. Também aqui o efeito da atenuação de transmitâncias em cada direção é considerado.

d) Número de Luminárias visualizadas, seguindo-se uma lista com o índice de cada luminária visualizadas, com a direção de visualização do centro fotométrico, e o fator de cálculo correspondente à direção / distância atenuado pela transmitância verificada naquela direção; este fator será aplicado à curva fotométrica da luminária indicada na direção especificada, correspondendo à iluminância inicial gerada pela luz artificial.

II) Arquivo dos Fatores de Forma: estes valores são definidos, para cada vértice, segundo os planos projetados na máscara, identificando-se o vértice correspondente à direção do plano visualizado (a área de influência do vértice que é interceptada no plano), atenuada pela transmitância da direção. Em vértices visualizados segundo várias direções, o fator de forma do vértice é obtido pela integração dos fatores de forma unitários de cada direção. Este arquivo também é organizado na sequência dos vértices receptores, registrando, para cada um, o número de vértices (frações dos planos) emissores visualizados, seguindo-se a lista dos vértices visualizados e

dos Fatores de Forma correspondentes, atenuados pela transmitância nas direções que descrevem cada triângulo.

Observe-se que toda a estrutura de dados obedece ao conceito de arquivos sequenciais, ou seja, de que os dados estão inscritos numa sequência contínua no arquivo, e não em lotes de registros pré-dimensionados, característicos dos arquivos de acesso aleatório.

O procedimento básico para a aplicação da equação da Radiosidade na determinação de uma solução de iluminação para uma dada configuração de abóbada (considerando-se apenas a luz natural) vale-se do conceito de leitura sequencial, muito mais rápida, e segue 4 passos:

a) Determinação da abóbada, da iluminância dos planos uniformes e do solo.

b) Determinação da iluminância inicial de cada vértice dos Planos Principais e de Análise, considerando as direções de céu visíveis do vértice, os planos uniformes visualizados e o efeito solo (além da iluminância inicial gerada pelas luminárias, no caso de simulações envolvendo a luz artificial).

c) Aplicação da Equação da Radiosidade nos Planos Principais segundo o número de ciclos especificados.

d) Transferência do fluxo dos Planos Principais para os Planos de Análise após a solução da Radiosidade.

Os resultados são obtidos um **lux**, para iluminâncias, em **cd/m²** para as luminâncias e em % para outros indicadores como o DLF, por exemplo.

Entendida a estrutura de dados da visibilidade é possível então passar-se à proposição conceitual metodológica da tese, como segue.

4 PROPOSIÇÃO METODOLÓGICA PARA DETERMINAÇÃO DA ESTIMATIVA ANUAL DE LUZ NATURAL ATRAVÉS DA RADIOSIDADE

Neste capítulo descreveremos o conceito central desta tese, qual seja, apresentar uma metodologia inovadora, própria para a utilização dos algoritmos do Modelo Vetorial Esférico - MVE, fundados no método da Radiosidade, a ser utilizada na determinação da Estimativa Anual de Luz Natural segundo os 15 modelos de céu da Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E 2003, utilizando arquivos climáticos digitais.

O conceito de **Estimativa Anual de Luz Natural – EALN** - será usado doravante como o conjunto dos resultados de iluminâncias associadas a pontos de planos de análise obtidos através de uma sucessão de simulações para unidades temporais definidas ao longo de um ano (unidades horárias, inicialmente), dentro de um intervalo horário diário (entre 8 h e 18 h, p.ex.), associado cada resultado de iluminâncias a uma distribuição de luminâncias celestes determinadas a partir da definição de um dos 15 modelos de céu caracterizados a partir da leitura e interpretação de dados contidos em um arquivo climático específico.

A partir da **EALN** é possível aplicar aos resultados as diferentes métricas de simulação dinâmica aplicadas ao clima, como o Daylight Autonomy – **DA** e o Useful Daylight Illuminances – **UDI**.

A metodologia envolve três conceituações:

I) A primeira conceituação é a de um modelo para a caracterização da distribuição de luminâncias da abóbada segundo um dos 15 modelos de céu normalizados feita a partir dos dados de arquivos climáticos, utilizando-se alternativamente dados de radiação solar ou de iluminâncias, caso disponíveis. Ressalte-se que os modelos de céu apresentam relações proporcionais entre a luminância do Zenith e a luminância de cada outra direção, sendo necessário determinar não só o modelo de céu a considerar em uma dada circunstância como também o valor absoluto da luminância do Zenith na circunstância. Nesta conceituação, além dos dados da norma iremos também nos valer das indicações conceituais dos trabalhos que aprofundam a norma, trabalhos estes que estabelecem referências e diretrizes para soluções desta caracterização.

II) A segunda conceituação é a de um modelo para a determinação de coeficientes que permitam, a partir dos arquivos de Visibilidade conceituados no MVE, obter a Estimativa Anual de Luz Natural a partir dos modelos de céu caracterizados com os dados dos arquivos climáticos, em simulação encadeada utilizando cálculo matricial. Aqui demonstraremos três abordagens de cálculo:

a) Através de Daylight Coefficients - DLC: correspondendo à abordagem clássica do conceito, conforme descrito na revisão bibliográfica, resolvido no contexto do Modelo Vetorial Esférico – MVE, através da Radiosidade.

b) Através de Coeficientes de Radiosidade – CR: correspondendo a uma abordagem diferente e inovadora do DLC clássico, que não parte da setorização 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, que descreveremos adiante.

c) Através da 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.

Demonstraremos que sob certas circunstâncias envolvendo simulações com resoluções variadas de baixa a alta visibilidade, relacionadas com resoluções geométricas variadas de baixa a alta complexidade, cada uma das 3 abordagens pode ser mais eficiente que as outras duas na avaliação da **EALN**.

III) A terceira conceituação refere-se aos métodos de determinação da **Estimativa Anual de Luz Natural – EALN** propriamente dita, associados a cada um dos métodos de coeficientes – **DLC** e **CR** - ou da **Radiosidade Plena**, conforme indicado no item anterior.

Conceitualmente, os 3 métodos devem conduzir ao mesmo resultado, descontadas eventuais pequenas diferenças decorrentes de precisão em cada procedimento de cálculo.

Para cada uma das conceituações apresentadas serão apresentados métodos de verificação dos conceitos em resultados práticos de simulação.

Apresentamos primeiro o conceito de determinação dos modelos de céu, já que ele será igualmente usado por todos os 3 métodos de determinação da EALN que serão apresentados em seguida.

4.1 DETERMINAÇÃO DOS MODELOS DE CÉU E DE DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS A PARTIR DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS

Conforme demonstrado, os descritores dos modelos de céu apresentados por Kittler at ali (1997) não permitem determinar precisamente qual o modelo a adotar a partir dos dados climáticos, havendo alguma superposição dos parâmetros de referência para a escolha..

Dos 6 descritores indicados, 3 deles derivam diretamente dos dados dos arquivos climáticos:

- a) Razão entre a Iluminância Difusa Horizontal (**Dv**)²⁷ e a Iluminância Horizontal extraterrestre (**Ev** - esta normalizada pelo ângulo solar): **Dv / Ev**
- b) Brilho Δ (delta);
- c) Turvamento **Tv**.

Os outros 3 derivam direta ou indiretamente da Luminância do Zenith, que pode ou não estar presente nos arquivos climáticos:

- a) Padrão de Gradação, dada pela razão entre a Luminância do Zenith e a do horizonte.
- b) Prolongamento da Indicatriz
- c) Razão entre a Luminância do Zenith e a Iluminância Difusa Horizontal - Lz/ Dv

Estes 3 últimos descritores são apresentados com restrições relativas a alturas solares específicas, não sendo aplicáveis a qualquer circunstância, conforme os autores.

Mais de um modelo de céu podem se encaixar nos intervalos característicos dos descritores, conforme apresentado na revisão bibliográfica.

Desta forma, optou-se por trabalhar com os descritores que derivam diretamente de dados medidos: Razão **Dv / Ev**; Brilho Δ (**delta**); Turvamento **Tv**.

Para desenvolvimento do procedimento criou-se uma variável complexa denominada **step**, que está associada a um determinado tipo de céu caracterizado pelos descritores e grandeza obtidas. Cada step está associado a uma unidade horária no procedimento de determinação da EALN. No caso de um ano considerado com 8.760 horas, a cada hora está associado a um step, obtido a partir da interpretação da linha correspondente no arquivo climático. A estrutura de dados do step está descrita no Quadro 1.

O procedimento inicia-se com a análise de consistência dos dados do arquivo climático. Quando estão presentes, são tomados os valores da Iluminância Global Horizontal **Gv**, a Iluminância Difusa Horizontal **Dv** e a Iluminância Direta Normal ao Sol **Pn**, que é convertida, através do ângulo solar, em Iluminância Direta Horizontal **Pv**. Se estes valores não estão presentes

²⁷ Utilizaremos a nomenclatura encontrada nos textos de consulta, apesar da aparente discrepância de anotar Iluminância Difusa Horizontal como **Dv** (no trabalho original) e não, como a grandeza sugere, **Dh**.

aplicam-se as fórmulas de eficiência luminosa de Peres (1990), que se inicia com a determinação das categorias de claridade.

Quadro 1: Classe de para definição das variáveis complexas do tipo **step** para caracterização de um tipo de céu.

```

class stepceu{ public:
int  a, d, m, ho, mn, j; // ano, dia do mes, mes, hora e minutos, dia no ano;
float Lz, // Lum. zenith
      Dv, // Ilum. Difusa
      Ev, // Iluminância Horizontal Extraterrestre
      Pv, // Iluminância solar direta horizontal exterior
      Pn, // Iluminância solar direta normal exterior
      avr, //
      mor, // massa ar otica relativa
      Z, // angulo solar com o zenith
      Gv, // iluminancia global
      /// descritores de seleção
      clr, // claridade
      W, // conteudo de água precipitavel
      Tv, // fator de turvamento
      LD, DE, DT; // relações Lz/Dv Dv/Ev e brilho delta
vet1 sol; // cossenos diretores do Sol
vet2 sol2; //altura solar azimute
/// valores auxiliares
float h, hn, hp, lt, lg, alt; // hora corrente, nascente e poente
int ps; // pos sol no globo
int ct, tp; // categoria de claridade e tipo de céu ISO
/// operadores
stepceu operator=(stepceu);
};

```

Fonte: código de programação APOLUX

A partir da determinação do coeficiente de claridade, são selecionados os parâmetros discretos aplicados nas fórmulas de eficiência luminosa e calculadas as Iluminâncias **Gv**, **Dv** e **Pn**, que é convertida em **Pv**. Determina-se então **Ev**, segundo Darula e Kittler (2002). Desta forma pode-se estabelecer a relação normalizada segundo a Fórmula 33, onde:

$$(Gv/Ev) = (Pv/Ev) + (Dv/Ev) \quad (33)$$

Nem sempre esta relação matemática se verifica nos dados convertidos.

Assim optou-se por considerar os valores **Gv** (principal) e **Dv** como geradores prioritários, nesta ordem, e o valor de **Pv** como decorrente da fórmula, quando inconsistente com a relação de soma.

Através de Pv/Ev determina-se o **Turvamento (Tv)** conforme Darula e Kittler (2002)

A **Razão Dv/Ev** é dada diretamente da fórmula acima

O **Brilho Δ (delta)** é obtido usando-se o Modelo ASRC – CIE, conforme citado por Perez et ali. (1990) representado na Fórmula 34, abaixo:

$$\epsilon = [(Dh + I)/Dh + kZ^3]/[1 + kZ^3] \quad (34)$$

Onde:

Dh é a irradiação difusa horizontal;

I a irradiação direta de incidência normal;

k é a constante, igual a 1,041 para **Z** em radianos;

A formulação Z^3 foi adicionada à expressão original, sendo uma expressão simplificada para eliminar a dependência entre esse componente e o ângulo solar com o Zenith.

Foi criada uma tabela de intervalos comuns destes descritores, coerente com a apresentada em Kittler et ali (1997), com um valor mínimo, um médio e um máximo estipulado. A relação completa dos intervalos de descritores está no Anexo B.

O procedimento então verifica, para o *step* corrente, os valores de Turvamento **Tv**, Razão **Dv/Ev** (que indicaremos **DE**) e Brilho Δ (que indicaremos **DT**).

A partir destes valores, toma-se cada descritor e verifica-se para cada um dos 15 tipos de céu, se o valor do descritor no *step* está contido no intervalo típico do descritor em cada tipo. Cada um dos três descritores é verificado para cada um dos 15 tipos de céu.

São atribuídos valores diferentes aos descritores: a) **Tv** vale 1; b) **DE** vale 2; c) **DT** vale 4.

A cada *step* atribui-se como índice a soma dos valores dos descritores onde o step se enquadra.

Desta forma podemos resumir o enquadramento de um dado *step* conforme a Tabela 17.

Tabela 17: Combinações possíveis de enquadramento de um step segundo os 3 descritores

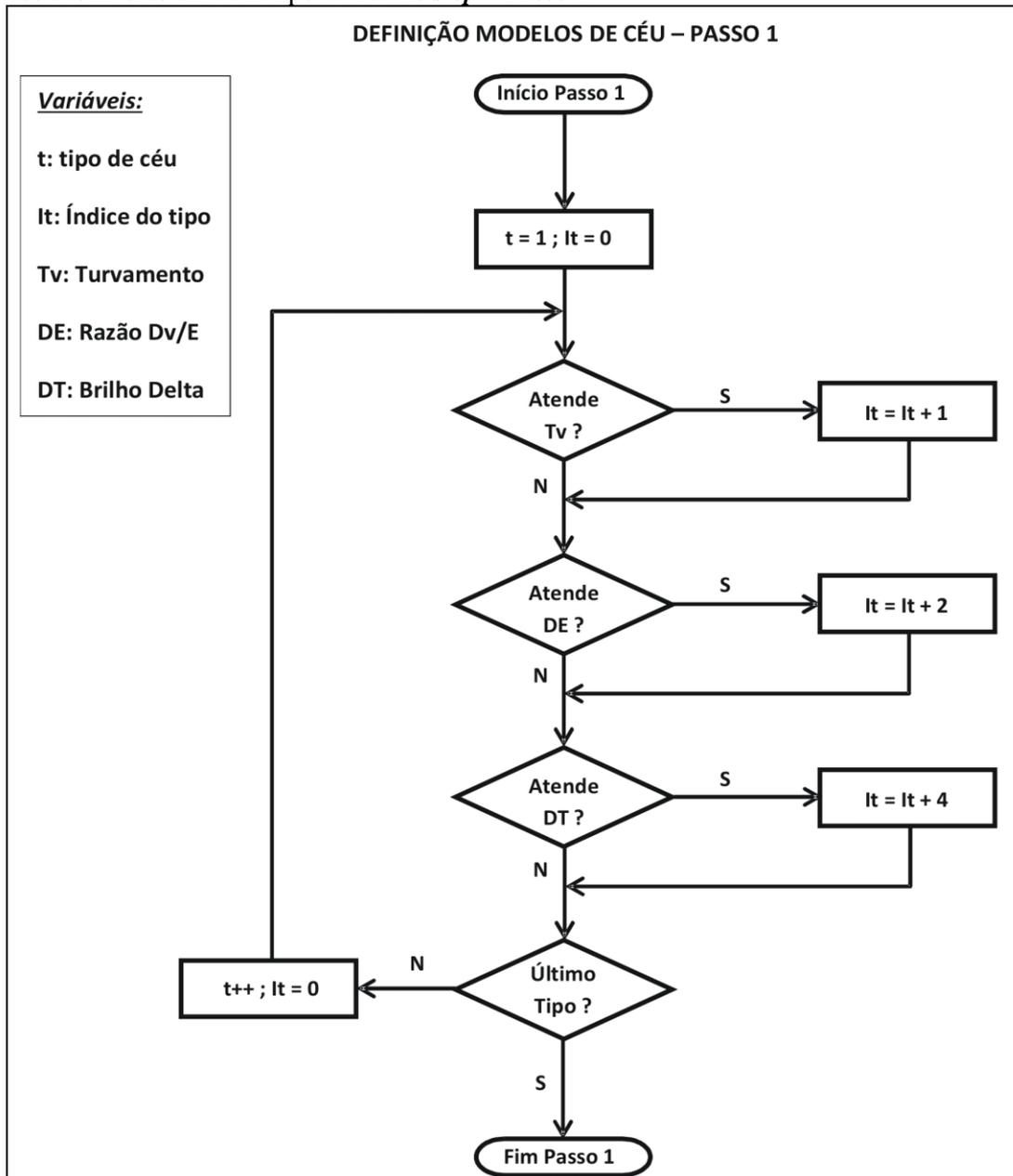
DESCRITORES (Atende a)	Tv (+1)	DE (+2)	DT (+ 4)	ÍNDICE
Tv, DE e DT	1	2	4	7
Tv e DE	1	2	0	3
Tv e DT	1	0	4	5
DE e DT	0	2	4	6
Tv	1	0	0	1
DE	0	2	0	2
DT	0	0	4	4
Nenhum	0	0	0	0

Fonte: autoria própria

O procedimento computacional é dividido em 4 Passos, cada um correspondendo a um algoritmo de tratamento dos descritores e sua análise.

O algoritmo do **Passo 1**, representado na Figura 40, calcula para cada *step* o índice correspondente ao atendimento dos 3 descritores em cada um dos 15 tipos de céu, conforme a Tabela 17.

Figura 40: Algoritmo de definição do índice de atendimento aos descritores em cada tipo de céu no *step* – Passo 1.

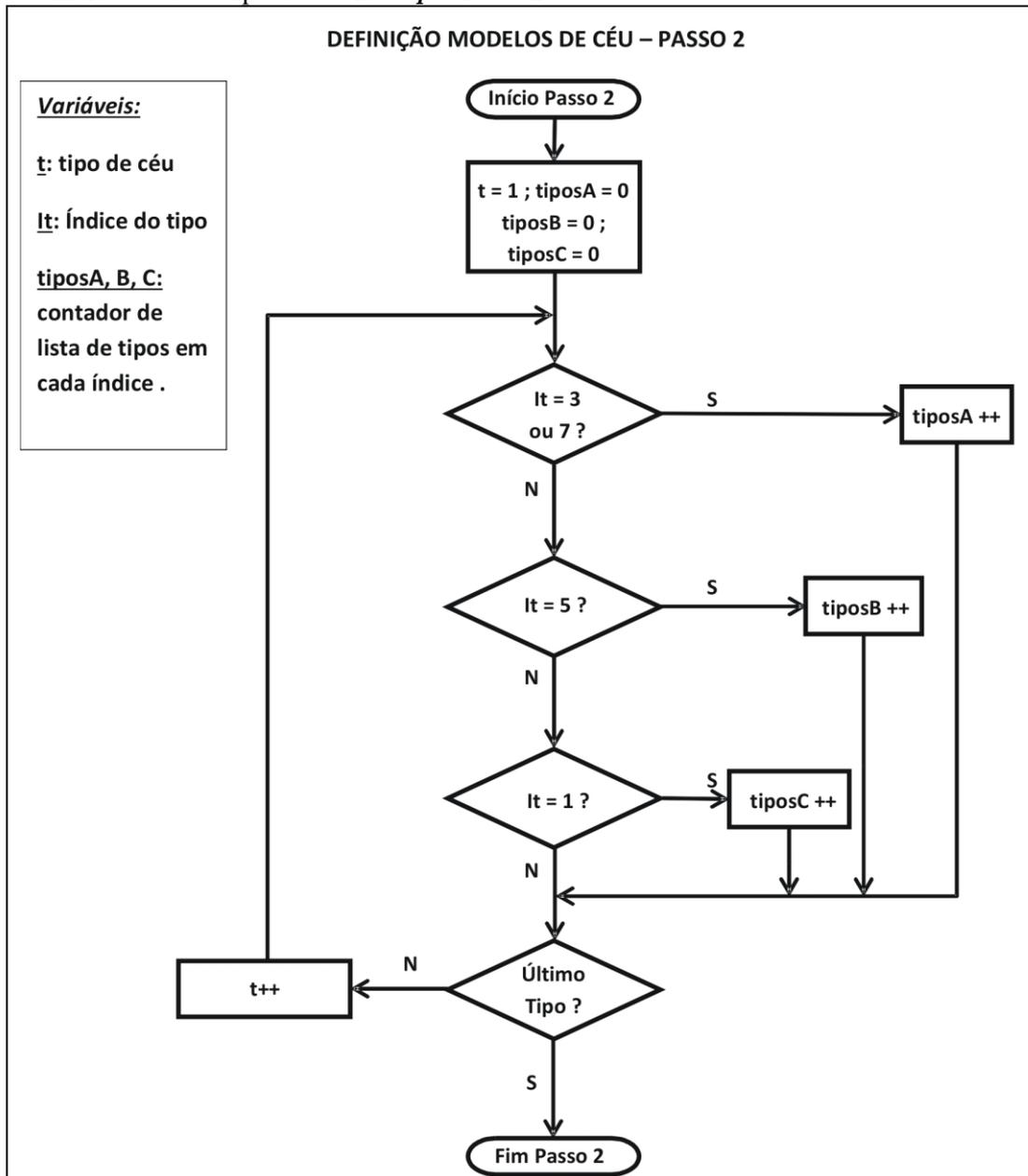


Fonte: Autoria própria

O algoritmo do **Passo 2**, representado na Figura 41, constrói as listas de prioridades, sendo que a principal (tiposA, no algoritmo) indica os tipos de céu do *step* que atendem, além de **Tv** (valor 1) também a **Dv/Ev** (valor 2), e alternativamente a **DT** (valor 4). Nesta lista entram então os tipos que tiveram índice 3 ou 7. Na segunda lista (tiposB) entram os tipos que além de **Tv** (valor 1), não atendem **Dv/Ev**, mas atendem a **DT** (valor 4). Nesta lista entram os tipos que tiveram índice 5. Finalmente, na terceira lista (tiposC) entram os tipos que atendem apenas a **Tv** (valor 1). Tipos de céu que não atendem o Turvamento (correspondente aos índices 2, 4 e 6) não são considerados, porque em princípio o Turvamento sempre deverá ter um enquadramento, já que a consistência dos dados é testada em etapas anteriores. No entanto, por uma questão de lógica no processamento, caso algum tipo não se enquadre no Turvamento nesta etapa, é inconsistente e deverá ser descartado.

Figura 41: Algoritmo de construção das listas de prioridades

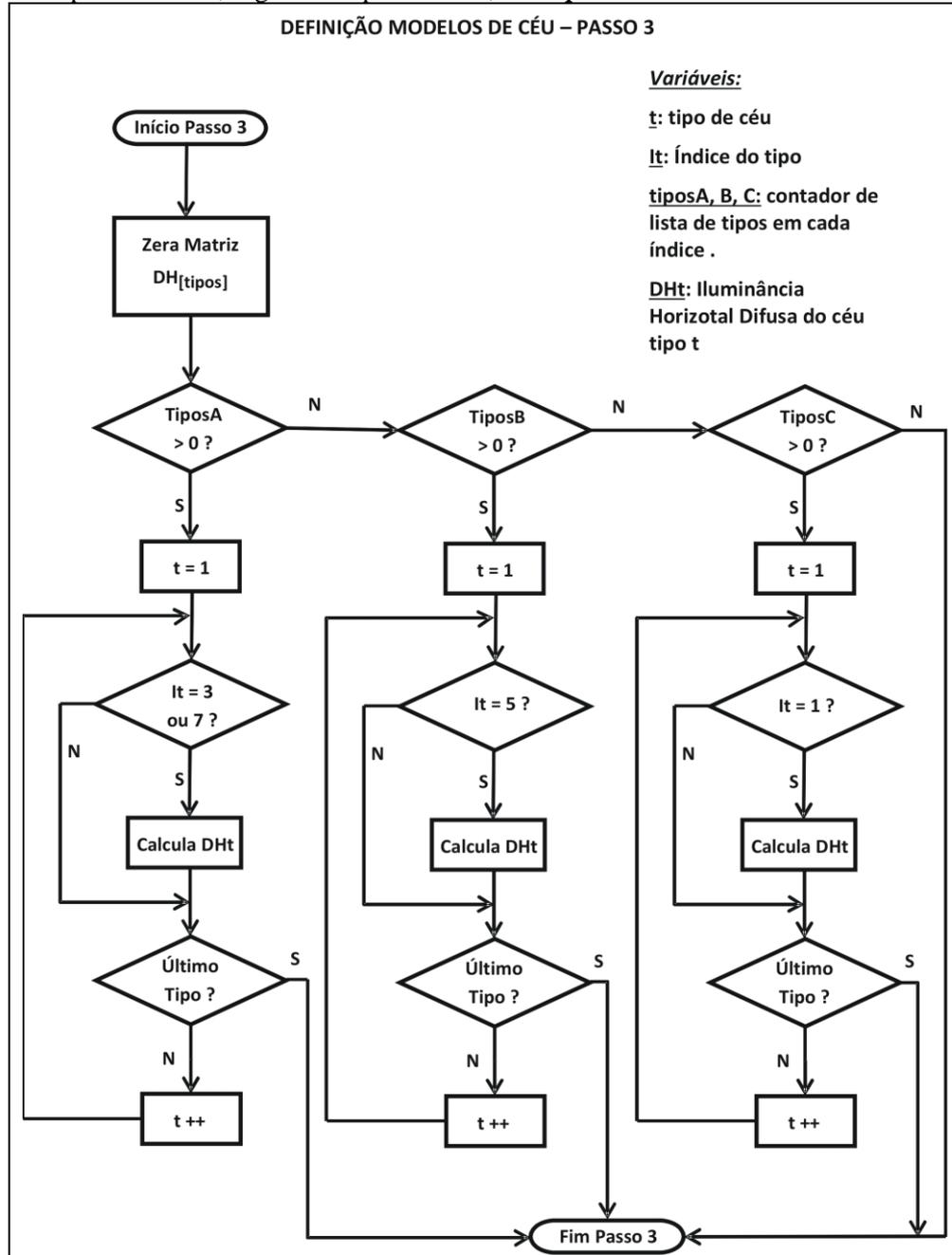
dos índices de cada tipo de céu no *step* – Passo 2.



Fonte: A autoria própria

O algoritmo do **Passo 3**, representado na Figura 42, toma a lista prioritária (tiposA) e procede ao cálculo da Iluminância Difusa Horizontal para cada tipo de céu que atendeu aos índices 3 ou 7. O algoritmo define a Luminância do Zenith para cada tipo usando o procedimento descrito por Darula e Kittler (2002) e aplica a fórmula de distribuição correspondente ao tipo para obter a distribuição da abóbada, que depois é integrada para obtenção da Iluminância Difusa Horizontal. Caso esta lista esteja vazia. Se esta lista tem tipos que atendem aos índices, o tipo de céu será escolhido entre eles no passo seguinte. Caso esta lista esteja vazia, é tomada a lista seguinte (tiposB) e calculados os tipos que atendem ao índice 5, caso existam, e o tipo será escolhido desta lista no passo seguinte. Caso esta segunda lista também esteja vazia, o procedimento passa para a terceira lista (tiposC) com o mesmo enfoque e dela será o tipo escolhido no passo seguinte. Se esta lista também está vazia, o *step* é descartado como inválido.

Figura 42: Algoritmo de cálculo das Iluminâncias Difusas Horizontais dos tipos das listas, segundo as prioridades, no *step* – Passo 3.

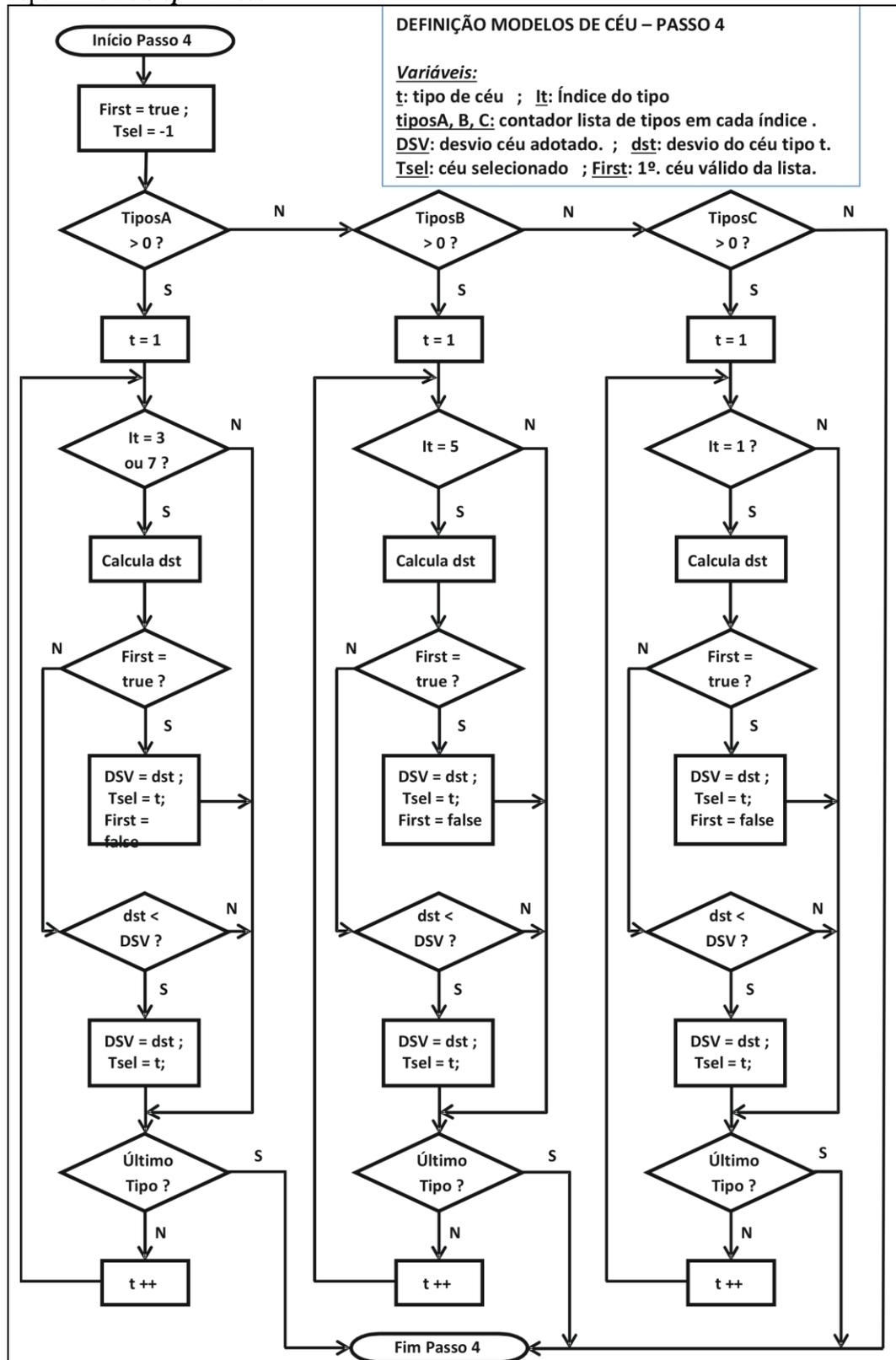


Fonte: Autoria própria

Finalmente no algoritmo do **Passo 4**, representado na Figura 43, o procedimento toma a primeira lista que não esteja vazia e calcula para cada tipo da lista o desvio da Iluminância Horizontal Difusa obtida para o tipo em relação à obtida no arquivo climático, considerando a diferença percentual em relação a ele e vai sucessivamente comparando os desvios entre os tipos. Aquele tipo que apresentar o menor desvio em relação ao valor de referência é adotado então como o tipo específico do *step*. Caso as 3 listas estejam vazias, o *step* é descartado como inválido..

Figura 43: Algoritmo de comparação dos desvios nas Iluminâncias

Difusas Horizontais calculadas em cada lista e seleção do tipo de céu específico do *step* – Passo 4.



Fonte: Autoria própria

Ao final desta sequência de passos o *step* válido terá um tipo específico definido entre os 15 normalizados, assim como uma Luminância absoluta do Zenith para determinar a distribuição de luminâncias absolutas da abóbada para aquele tipo.

4.2 OS DIFERENTES CONCEITOS DE COEFICIENTES: DLC, CR e RADIOSIDADE PLENA

Neste tópicO descreveremos os conceitos de Daylight Coefficients – DLC, Coeficientes de Radiosidade – CR e a Radiosidade Plena conforme aplicados ao MVE para determinação da EALN. Conforme a proposição deste trabalho cada um destes conceitos é mais adequado a uma situação específica.

A dimensão do cálculo computacional necessário para a determinação da EALN a partir da utilização dos arquivos de Visibilidade envolve 3 componentes, que chamaremos variáveis: a) a resolução de direções do globo utilizado no cálculo da Visibilidade, que será referência para todo o resto do processo; b) A quantidade de vértices em que foi dividido o modelo tridimensional na construção do Projeto de simulação; c) A quantidade de situações específicas, correspondendo a datas / horas específicas que se pretende simular ao longo de um período de tempo.

Nos dois primeiro métodos propostos, DLC e CR, é necessária a realização de sucessivos ciclos de radiosidade para determinação do conjunto de coeficientes que serão depois utilizados na determinação da EALN, num procedimento de 2 passos. No caso da Radiosidade Plena, o método aplica os sucessivos ciclos de radiosidade diretamente na determinação da EALN, sem cálculos de coeficientes, em um único passo.

De maneira genérica, temos cada um dos métodos propostos associados à quantidade de elementos a ser analisado em cada uma das 3 variáveis do cálculo. Para efeito da seleção, são consideradas apenas as direções da abóbada que são visualizadas por algum vértice principal (incluindo os de análise), assim como apenas os vértices principais que visualizam a abóbada (sem os vértices de análise) e apenas as horas / datas contidas no intervalo de tempo desejado:

a) Se o número de **direções da abóbada visualizadas pelos vértices principais**²⁸ 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.

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.

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.

Na determinação da visibilidade o programa determina quais as direções visualizadas por algum vértice e quais os vértices que visualizam alguma direção.

Analisaremos a seguir a influência de cada uma das variáveis no cálculo assim como o método para determinação da **EALN** associado à variável.

Em princípio, devemos tomar como referência que, se considerarmos uma situação de estudar em intervalos de 1 hora ao longo de um ano todas as situações em que o Sol está na abóbada celeste (independente de estar encoberto por nuvens ou não), que poderíamos chamar de horários diurnos, teremos para um período de 365 dias anuais em torno de 12 horas a cada dia, em média, nestes chamados horários diurnos, o que daria um total de 4.380 horas com luz natural, independente da latitude do local. Não estamos considerando neste momento da conceituação se os níveis de iluminância de início ou fim de manhã serão suficientes para ser considerado ou não. Utilizaremos, em princípio, este valor de 4.380 horas como referência de período máximo de tempo

²⁸ O programa lida, além das direções da abóbada, com os planos uniformes iniciais e o efeito solo. Neste trabalho consideramos a abóbada desobstruída sem o efeito solo, mas o conceito trata estes dois elementos como se fossem direções da abóbada, devendo-se calcular os DLC relativos a ele também.

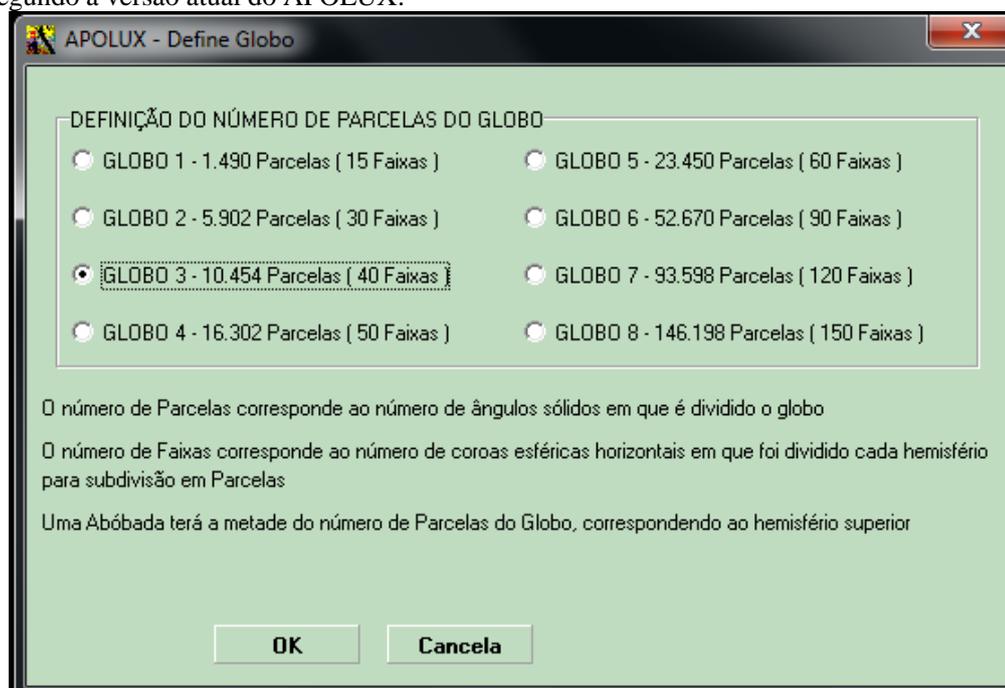
a analisar, quando considerados intervalos de 1 hora. Intervalos menores de tempo estarão associados também a este limite.

Tratando-se da abóbada, quando se lida com uma abóbada fracionada em 145 parcelas não há dúvida de que é mais prático e rápido trabalhar com o DLC, considerando-se uma temporalidade em torno de 4.380 horas. No método do Ray Tracing, a resolução da abóbada não depende da resolução de visibilidade do cálculo, associada à quantidade de raios emitidos. O computo do DLC é feito proporcionalmente à quantidade de raios que atingem uma determinada fração do céu e à porção de ângulo sólido que cada raio representa comparado à parcela, ou seja, maior resolução de visibilidade implica em maior quantidade de raios, mas representando menores ângulos sólidos no cálculo.

No Modelo Vetorial Esférico - MVE usado no APOLUX, entretanto, a visibilidade e a descrição da abóbada estão intrinsicamente ligadas, sendo ambas resultado da mesma projeção do ambiente no globo. Assim, o número de raios variando, varia também a descrição da abóbada, de sorte que no cálculo das soluções da radiosidade, a cada direção do globo corresponde uma porção da abóbada associada a uma luminância específica daquela direção. A posição do Sol também é representada por uma direção específica do globo, associada ao vetor que mais se aproxima da direção calculada do Sol. Em termos do cálculo, a determinação da abóbada, em si, não é problemática. Já o cálculo da iluminância inicial de cada vértice depende do número de direções da abóbada, embora este não seja o maior dispêndio de tempo do cálculo, que está na aplicação dos ciclos de radiosidade.

Na versão atual do MVE usado no Apolux são ofertadas 8 resoluções do globo, conforme mostrado na Figura 44:

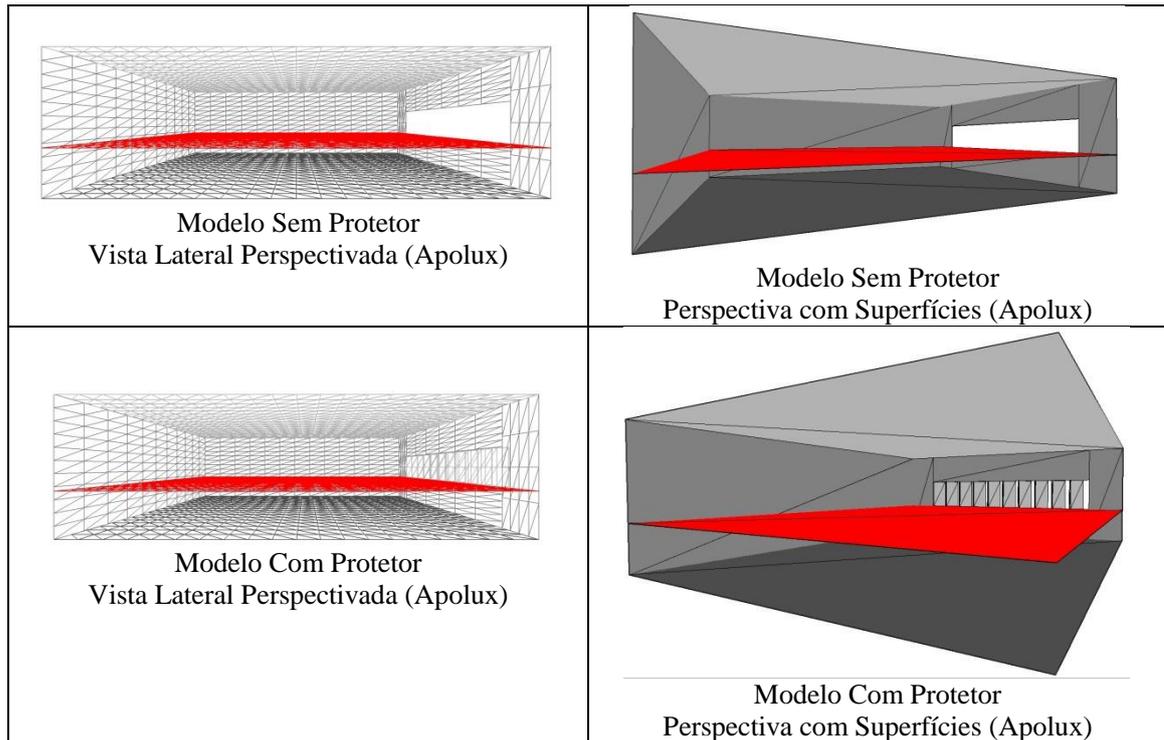
Figura 44: Resoluções possíveis do Globo de Vetores e quantidade de Direções de cada uma, segundo a versão atual do APOLUX.



Fonte: Programa APOLUX

A diferença de visualização segundo o globo escolhido pode ser bastante grande, se considerarmos o número de direções entre o globo de menor resolução, o Globo 1 com 1.490 direções (745 na abóbada) e o Globo 8, com 146.198 direções (73.099 na abóbada). Para demonstrar a influência da resolução do globo na precisão do cálculo utilizaremos de exemplo 2 ambientes retangulares de 8 x 10 com uma abertura frontal, que serão depois simulados nos procedimentos de verificação. Em um deles foram colocados protetores verticais inclinados na abertura, conforme representados ambos na Figura 45.

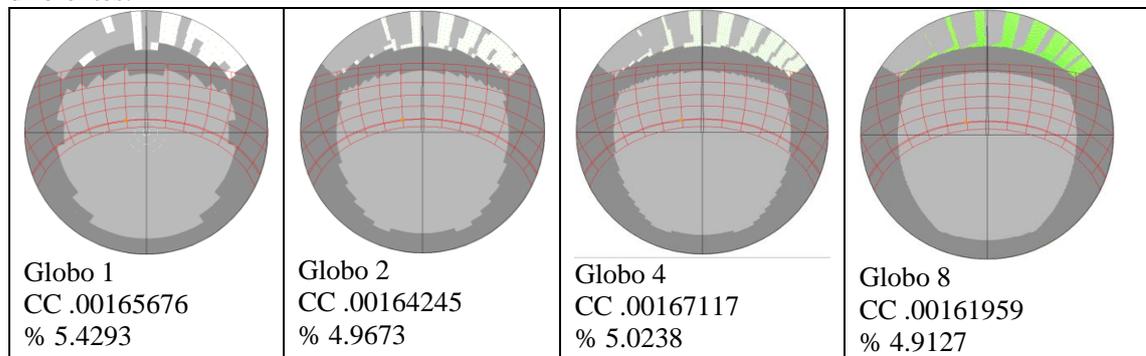
Figura 45: Visualização dos modelos utilizados na avaliação da precisão da visibilidade em cada Globo.



Fonte: Autoria Própria

Tomamos como exemplo o ambiente com protetores e determinamos um ponto no eixo central perpendicular à janela, a 2 metros desta. Para este ponto foram tiradas máscaras com os globos 1, 2, 4, e 8. A máscara determina, entre outros, 2 dados que utilizaremos para analisar precisão: a porcentagem desobstruída da abóbada (%) e a Componente Celeste, correspondente à somatória dos produtos do ângulo sólido de cada direção desobstruída pelo cosseno do ângulo formado entre o vetor da direção e o vetor da Normal do plano da máscara, que corresponde a um Fator de Forma da abóbada, cujo resultado total (todo o hemisfério desobstruído) é correspondente a PI. Na Figura 46 estão representadas, a título de exemplo, as máscaras e os dois indicadores de cada uma, tomadas para um ponto a 4 metros da janela do ambiente com protetores. Os valores do Globo 8 são os mais precisos.

Figura 46: comparação entre as projeções de máscaras de um ponto segundo 4 globos diferentes.



Fonte: Autoria própria

Observe-se que os valores de % e CC do Globo 2 são os que mais se aproximam dos valores do Globo 8, o que tem mais precisão, mas observe-se que no Globo 2 o espaço não é descrito da mesma forma, com a mesma precisão. Na descrição geométrica pode-se observar a crescente precisão da máscara.

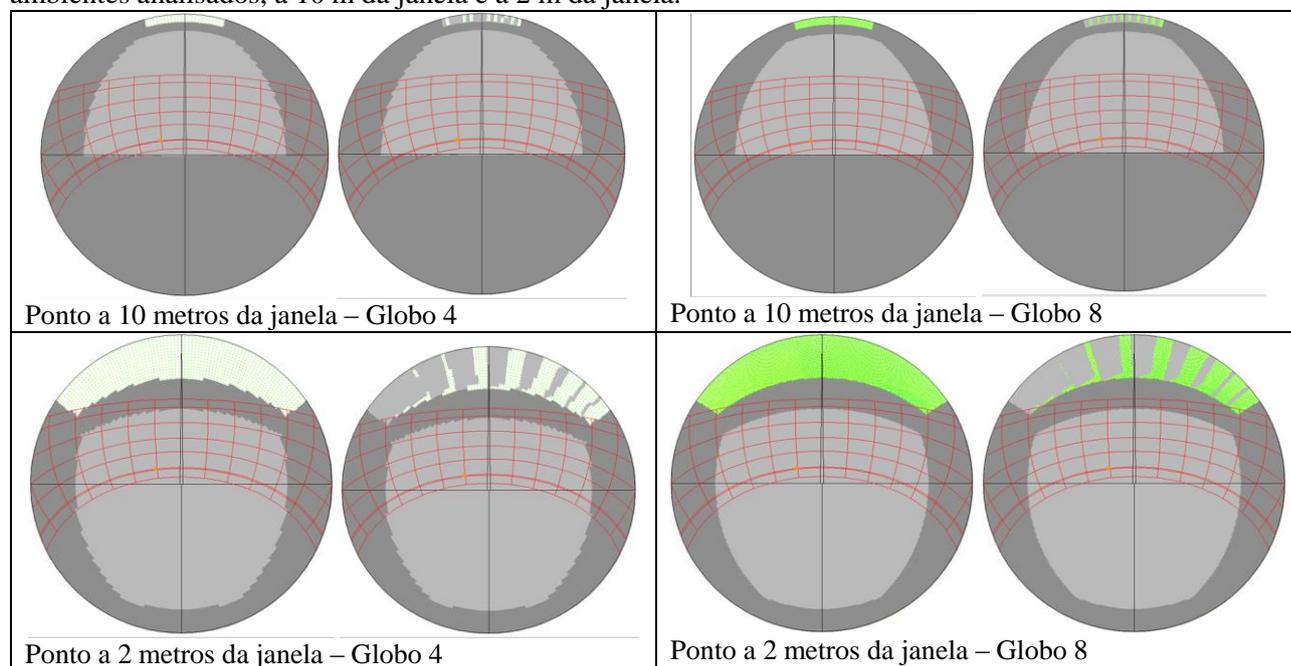
Nos trabalhos mais recentes usando o Apolux, a menor resolução que geralmente tem sido processada é a do Globo 4, com 16.302 direções, correspondendo à abóbada 8.151 delas (a metade superior). Isto porque, como foi demonstrado nas validações, as resoluções menores já apresentam erro mais significativo e a velocidade atual dos processadores nos equipamentos mais comuns já permite maior resolução, como veremos inclusive no decorrer deste trabalho. Por outro lado, as resoluções mais elevadas, particularmente a do Globo 8, já são mais eficientes nos equipamentos atuais, permitindo sua utilização em tempos que consideramos factíveis na execução de atividades de projeto de arquitetura, considerando toda a sua amplitude. Ganha-se muito em precisão, apesar do maior tempo.

Desta forma, consideramos como referência de Visibilidade neste trabalho o **Globo 4**, com 16.302 direções (8.151 na abóbada) como **Baixa Resolução**, o **Globo 6**, com 52.670 direções (26.335 na abóbada) como **Média Resolução** e o **Globo 8**, com 146.198 direções (73.099 na abóbada) como **Alta Resolução**.

Para análise da visibilidade foram projetadas máscaras no plano de análise numa linha central perpendicular à janela, em pontos indo da frente ao fundo do ambiente distanciados a cada 2 metros, nas resoluções dos Globos 4, 6 e 8, determinando-se para cada uma os 2 dados que nos permitem comparar as resoluções: porcentagem desobstruída da abóbada (%) e a Componente Celeste. No total foram projetados pontos nas distâncias de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 metros da janela, no eixo central perpendicular a ela, nos dois modelos e nas resoluções Baixa, Média e Alta, como descrito acima, num total de 36 máscaras, sendo então comparados os dois indicadores.

A hipótese de avaliação é que a máscara obtida com a maior resolução é a mais precisa, como demonstraram os estudos de validação do MVE. Na Figura 47 estão exemplificadas apenas as máscaras do ponto mais próximo da janela e do mais distante, em ambos os modelos, na maior e na menor resolução.

Figura 47: Exemplos comparativos das diferenças de resolução das máscaras em 2 pontos distintos nos 2 ambientes analisados, a 10 m da janela e a 2 m da janela.



Fonte: Autoria Própria

Os resultados numéricos da avaliação estão na Tabela 18, onde se destaca para cada ponto, o desvio das resoluções Baixa e Média em relação à Alta, referente ao valor da Componente Celeste - CC.

Tabela 18: Resultados comparativos dos valores calculados nas diferentes máscaras para Percentual da Abóbada e Componente Celeste (CC) em cada ponto.

AMBIENTE SEM PROTETOR	10 m	8 m	6 m	4 m	2 m	0 m
COMPONENTE CELESTE (CC) G8	0,00006560	0,0001359	0,0002998	0,00085530	0,00388200	0,057341
% ABÓBADA G8	0,87470	1,38550	2,33030	4,60930	12,04308	49,65520
COMPONENTE CELESTE (CC) G6	0,00007870	0,0001363	0,0002911	0,00086610	0,00389110	0,05764800
% ABÓBADA G6	0,95810	1,39520	2,28490	4,61440	12,03340	49,66460
DESVIO PARA G8 (CC) %	119,9695	100,2943	97,0981	101,2627	100,2344	100,5354
COMPONENTE CELESTE (CC) G4	0,00006320	0,0001431	0,0002879	0,00087500	0,00391618	0,05725200
% ABÓBADA G4	0,84810	1,42510	2,27410	4,64450	12,10070	49,60270
DESVIO PARA G8 (CC) %	96,3415	105,2980	96,0307	102,3033	100,8805	99,8448
AMBIENTE COM PROTETOR	10 m	8 m	6 m	4 m	2 m	0 m
COMPONENTE CELESTE (CC) G8	0,00002330	0,0000539	0,0001184	0,00033170	0,00161960	0,01336300
% ABÓBADA G8	0,31620	0,53260	0,90230	1,75500	4,91279	8,74464
COMPONENTE CELESTE (CC) G6	0,00003400	0,0000459	0,0001048	0,00034470	0,00160020	0,01330270
% ABÓBADA G6	0,39920	0,47520	0,82880	1,81690	4,89540	8,76160
DESVIO PARA G8 (CC) %	145,9227	85,1084	88,5135	103,9192	98,8022	99,5488
COMPONENTE CELESTE (CC) G4	0,00002180	0,0000436	0,0000835	0,00035980	0,00167110	0,01345300
% ABÓBADA G4	0,29500	0,44230	0,68830	1,81860	5,02380	8,79050
DESVIO PARA G8 (CC) %	93,5622	80,7557	70,4983	108,4715	103,1798	100,6735

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que quando o ambiente apresenta maior complexidade com os protetores e menores visualizações da abóbada, a diferença observada entre as resoluções Baixa e Média em relação à Alta é bastante significativa, sendo menos relevante quando o ambiente apresenta a janela totalmente desobstruída, numa grande abertura.

4.2.1 O Método do DLC Clássico Associado às Direções Visualizadas da Abóbada

A determinação do DLC clássico parte do arquivo de Visibilidade do Céu, onde está descrita a visão do céu, dos planos uniformes, do solo e também do foco fotométrico das luminárias.

No presente trabalho não abordaremos a verificação de procedimentos relacionados às luminárias, apenas os aspectos relacionados à estimativa anual de luz natural. Entretanto, posteriormente às verificações, teceremos algumas considerações sobre as possibilidades que os modelos conceituais abordados permitem com relação ao estudo da luz artificial.

No contexto destas conceituações, consideraremos as seguintes definições:

a) **vértice protagonista:** vértice de um plano opaco difuso ou transmissor difuso que participa das trocas luminosas durante a aplicação da equação da radiosidade, que possuem fator de forma calculado;

b) **vértice de análise:** vértice de um plano que foi definido, durante o cálculo da visibilidade, como sendo de análise.

c) **direção do céu:** direção do globo que está localizada no hemisfério superior, conforme a resolução calculada na visibilidade;

d) **plano uniforme:** plano definido como tendo a luminância uniforme em toda a superfície, não sendo considerado em vértices, e sim com um fator de forma correspondente à porção visualizada de todo o plano, quando é visualizado por algum vértice protagonista ou de análise.

e) **solo:** conjunto das direções do hemisfério inferior do globo que estão desobstruídas. O efeito solo é o fator de forma correspondente à somatória dos fatores de cada uma destas direções, quando o vértice protagonista ou de análise apresenta esta condição de visibilidade.

A Definição do DLC clássico proposta no MVE constitui uma razão numérica entre a iluminância que chega em um determinado vértice de análise partindo-se da luminância que emana de uma determinada direção e é captada ou diretamente pelo vértice de análise ou indiretamente através da equação da radiosidade nos vértices protagonista que captam luz daquela direção inicialmente.

Durante o cálculo da Visibilidade é criada uma lista para o modelo informando para cada direção da abóbada se existe algum vértice protagonista ou de análise que enxerga a direção. O mesmo procedimento é usado com os planos de análise e o solo. Como o arquivo de visibilidade é sequencial, são investigadas primeiro as direções do céu, depois o solo e depois os planos uniformes (estes denominaremos simplificadamente adiante como PUs). Para facilitar a explanação trataremos de agora em diante este conjunto como **direções / solo / PUs**.

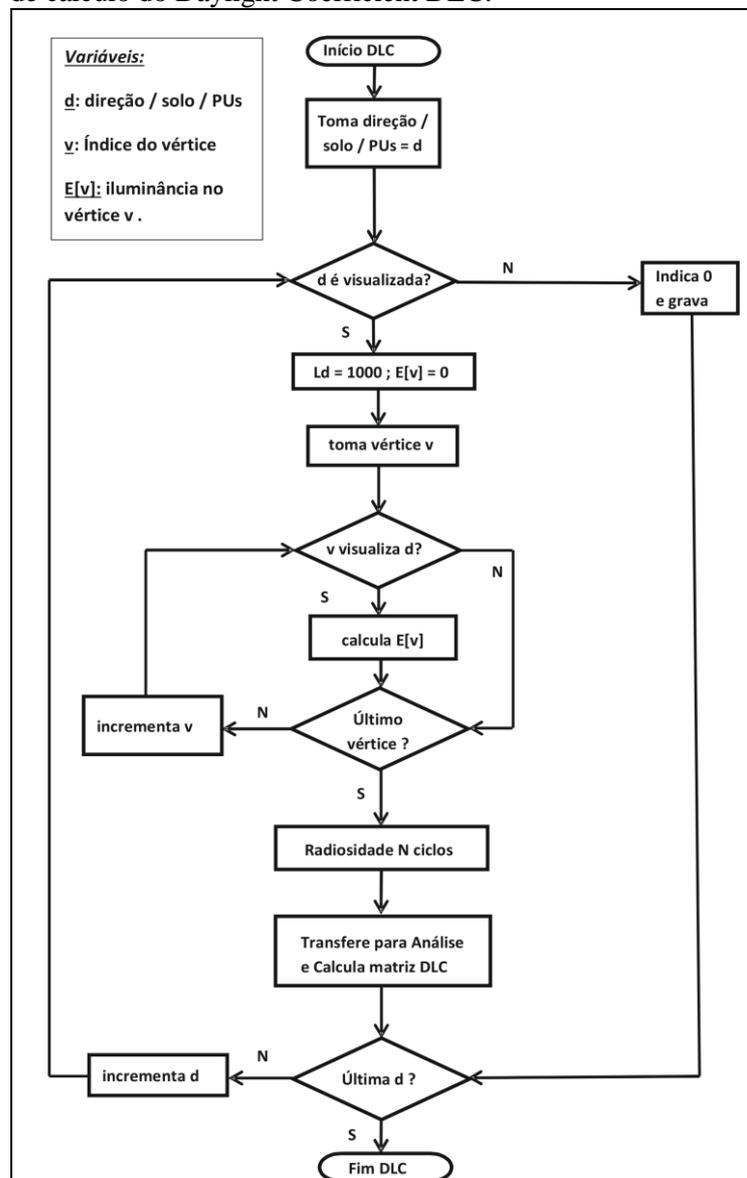
Na determinação do DLC são verificadas no arquivo de céu do projeto as direções do céu, solo e PUs que sejam visualizadas por pelo menos 1 dos vértices protagonistas ou de análise, assinalando-se então para cada direção / solo / PUs nesta condição um valor de referência de luminância²⁹. É computado para cada vértice protagonista ou de análise que visualizam a direção o valor da iluminância correspondente provocada por aquela referência, zerando-se todos os outros vértices. É aplicada, então, a equação da radiosidade conforme descrito no capítulo 3, transferindo-se os valores para os vértices de análise, somando-se estes à iluminância inicial de cada um. Ao final, os valores de iluminância computados para cada vértice de análise, que no caso somam a captação direta com a refletida, são divididos pelo valor de referência da luminância da **direção / solo / PUs**, obtendo-se então o DLC de cada vértice em relação àquela **direção / solo / PUs**. A matriz dos DLCs de cada **direção / solo / PUs** para o conjunto dos vértices de análise é gravada então no arquivo para uso posterior.

Destacamos aqui a utilização do cálculo matricial para evitar sucessivas leituras dos arquivos de visibilidade do céu na determinação dos vértices que visualizam cada direção, assim como da leitura dos arquivos de fatores de forma na aplicação da equação da radiosidade. No caso deste estudo estabelecemos uma matriz de 1.000 valores para o cálculo matricial. Assim, por exemplo, na resolução baixa de 8.151 direções celestes, o processamento foi realizado em apenas 9 lotes. Na mais alta resolução foi realizado em 74 lotes de direções. Isto reduz significativamente o tempo de leitura dos arquivos. Nas outras duas conceituações o mesmo procedimento foi adotado e não nos referiremos mais a ele.

²⁹ No caso foi considerado 1.000 cd, para que na determinação dos DLC houvesse mais precisão, já que uma fração muito pequena da luminância de cada direção, em termos numéricos de cálculo, chega a cada vértice de análise.

O algoritmo de representação lógica do procedimento de cálculo do Daylight Coefficient – DLC é mostrado na Figura 48:

Figura 48: Algoritmo de representação lógica do procedimento de cálculo do Daylight Coefficient DLC.



Fonte: Autoria própria

4.2.2 O Método do Coeficiente de Radiosidade – CR - Associado aos Vértices das Superfícies do Projeto

O conceito de Coeficiente de Radiosidade – **CR** - pode ser definido a partir dos mesmos princípios físicos que definem o DLC.

Podemos considerar que na aplicação da equação da radiosidade, a troca de fluxos luminosos entre os diferentes vértices do projeto, em síntese, pode ser entendida como a somatória das trocas que se estabelecem nas inter-reflexões consideradas a partir do fluxo inicial emitido por cada um dos vértices em particular, representando parcelas de um plano.

Define-se então o **Coeficiente de Radiosidade - CR** de um **vértice protagonista** emissor em relação a um **vértice de análise** como sendo a razão entre o valor da iluminância que após um número específico de inter-reflexões incide nesse **vértice de análise** e a iluminância inicial de um

único **vértice protagonista** específico que gerou o fluxo transferido através das inter-reflexões nas superfícies dos ambientes.

A própria definição da Equação da Radiosidade é um cálculo matricial simultâneo que integraliza essas trocas individualizadas que se configuram a partir dos fatores de forma.

Observe-se que este procedimento não utiliza os arquivos de Visibilidade do Céu, e sim os Arquivos de Visibilidade dos Fatores de Forma. O cálculo depende apenas de saber se o vértice recebe iluminância inicial de pelo menos uma direção do céu, do efeito solo ou de um plano Uniforme inicial.

Assim como no DLC é possível isolar a distribuição sucessiva do fluxo partido de uma determinada porção específica do globo (**direção / solo / PUs**) e determinar o quanto dele chegará a cada vértice de análise específico, também é possível individualizar o fluxo que parte de um determinado **vértice protagonista** específico e depois de um determinado número de inter-reflexões, chega ao plano de análise. O caminho para este cálculo é similar ao do DLC, mas não depende diretamente do número de **direções / solo / PUs** visualizadas, como no DLC, e sim do número de **vértices protagonistas** do projeto que visualizam alguma **direção / solo / PUs**.

Durante o cálculo da visibilidade é gerada, em contraponto à lista das **direções / solo / PUs** que são visualizadas por algum **vértice protagonista** ou **de análise**, uma lista contendo os **vértices protagonistas** que visualizam alguma **direção / solo / PUs**. Neste caso não são incluídos os **vértices de análise**, diferentemente da lista criada para o DLC, porque no caso deste último é necessário saber qual **vértice de análise** receberá iluminância direta inicial, já que os arquivos de visibilidade não serão utilizados no cálculo da **EALN**, sendo necessário incluir já no coeficiente de cada **vértice de análise** a componente direta, que inclusive será usada para determinar a incidência direta de Sol, quando for o caso. Já no método do **Coefficiente de Radiosidade** os arquivos de visibilidade do céu serão usados apenas na etapa seguinte, do procedimento de determinação da **EALN** para a definição da iluminância inicial dos **vértices protagonistas**, sendo então também usados para determinar a iluminância inicial dos **vértices de análise**, como se verá mais detalhadamente diante.

No procedimento onde se calcula então os **CRs**, é tomado cada **vértice protagonista** que está na lista acima e atribuída a ele uma iluminância inicial de referência, sendo a iluminância inicial de todos os demais **vértices protagonistas** zerada. Aplica-se então os ciclos de radiosidade. O resultado do fluxo distribuído nos diferentes **vértices protagonistas** ao final dos ciclos é então transferido para os **vértices de análise**. Divide-se então o valor da iluminância de cada **vértice de análise** pelo valor da iluminância inicial do **vértice protagonista** corrente, estabelecendo-se então os **Coefficientes de Radiosidade** dos primeiros em relação ao segundo.

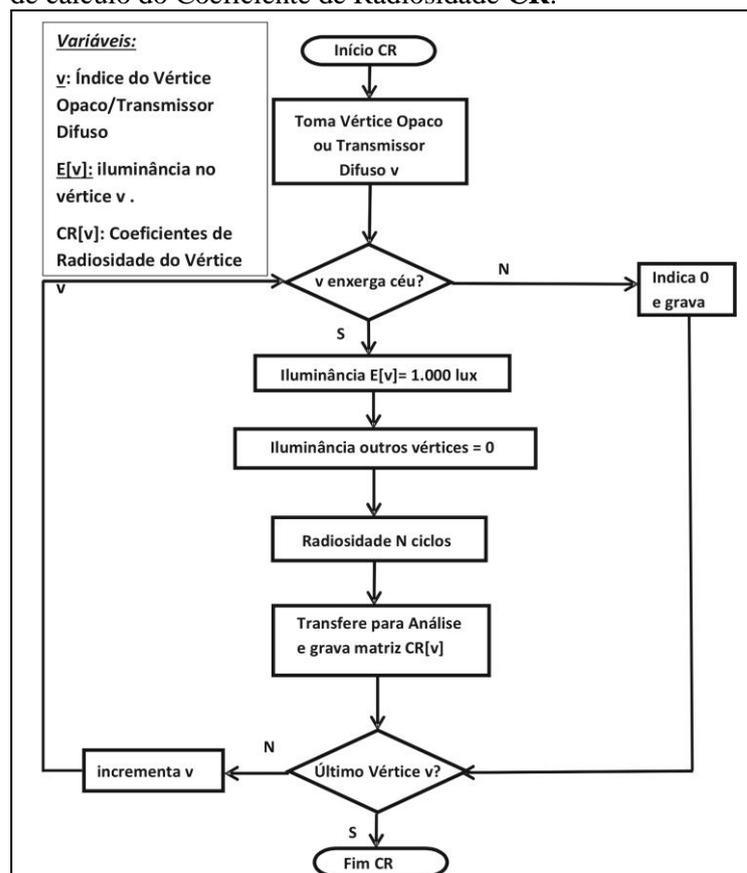
Este método depende indiretamente da resolução porque no cálculo da visibilidade maior resolução pode implicar num maior número de fatores de forma, por descreverem a visibilidade com maior abrangência dos vértices do projeto. Mas na determinação dos **CRs** o que influi, além do número de vértices, é o número de fatores de forma a utilizar na radiosidade.

Imaginemos que o número de fatores de forma relaciona a quantidade de vértices com a quantidade de direções num hemisfério.

Supondo-se que o número de vértices é menor que o número de direções, o número de fatores de forma nunca será maior que o número de vértices. Por outro lado, se o número de vértices for maior que o número de direções, o número máximo de fatores de forma será limitado pelo número de direções no hemisfério de visibilidade do plano que contém o vértice.

O algoritmo de representação lógica do procedimento de cálculo dos Coeficientes de Radiosidade – CR é mostrado na Figura 49.

Figura 49: Algoritmo de representação lógica do procedimento de cálculo do Coeficiente de Radiosidade **CR**.



Fonte: autoria própria

4.2.3 O Método da Radiosidade Plena Associado às Unidades de Horas / Datas da EALN.

O método da **Radiosidade Plena** tem uma conceituação bastante simples: consiste em utilizar diretamente os arquivos de visibilidade na realização de um conjunto de ciclos de radiosidade para cada unidade de tempo do período de análise num *loop* para determinação direta da EALN. Em princípio este método deve ser mais eficiente quando o número de datas/ horas é menor que o número de **direções / solo / PUs** visualizados ou o número de **vértices protagonistas** que visualizam **direções / solo / PUs**. A perspectiva é de que deverá ser menor o número de aplicações dos ciclos de radiosidade nestas circunstâncias do que as necessárias para a determinação dos **DLCs** ou dos **CRs**. Trata-se de realizar uma simulação estática característica do MVE para cada unidade de tempo com a configuração da abóbada que lhe é pertinente. Aqui o procedimento tem todas as características da simulação estática e disponibiliza todos os dados gerados nestas circunstâncias. Não há etapa de definição de coeficientes, partindo-se diretamente do cálculo da visibilidade para o da EALN.

4.3 PROCESSAMENTO DA ESTIMATIVA ANUAL DE LUZ NATURAL – EALN – NOS DIFERENTES MÉTODOS

A escolha do melhor procedimento pode ser determinada a partir do fim do cálculo d visibilidade, quando se conhecerá o número de **direções / solo / PUs** visualizadas assim como o número de **vértices protagonistas** inicialmente iluminados. Caso o período de tempo a estimas a EALN já esteja definido, o procedimento adequado será aquele que, dentre os 3, apresentar menor valor, como já foi demonstrado. Na hipótese de se pretender fazer inúmeras simulações de EALN, com diferentes períodos, mesmo após a escolha de um dos dois métodos iniciais pode-se optar pelo

método da Radiosidade Plena (associado às horas / datas) porque os arquivos de Visibilidade sempre já estarão sempre calculados.

O primeiro passo na etapa de determinação da **EALN** é comum aos 3 métodos que definem o passo anterior. Consiste na determinação da distribuição de luminâncias da abóbada para um determinado **step**, que representa a unidade de tempo associada a uma determinada data / hora do arquivo climático. Como descrito anteriormente, cada **step** já traz a definição do tipo de céu correspondente à sua unidade de tempo, assim como a Luminância do Zenith em valor absoluto, determinadas conforme o procedimento descrito no **tópico 4.1** deste capítulo.

Aqui também se utiliza o método matricial, preenchendo-se uma matriz para um lote de distribuições de luminâncias de cada direção da abóbada, que chamaremos de **matriz da abóbada**. Esta matriz contém também a luminância determinada para os **planos uniformes** e para o **solo** associada a cada distribuição da matriz. Esta matriz será usada nos 3 métodos, conforme descreve-se a seguir. O arquivo de **steps** contém todas as descrições do arquivo climático já interpoladas, quando for o caso de criar subdivisões nos intervalos de tempo (p.ex. **steps** de 15 minutos em arquivos de 1 hora de intervalo) ou de tomar intervalos mais espaçados (p.ex. **steps** de 2 horas em arquivos de 1 hora de intervalo). Inclui **steps** com abóbadas válidas ou inválidas, conforme descrito anteriormente. É na etapa de determinação da **EALN** que os limites horários entre intervalos de tempo são especificados, como por exemplo, limite entre 8:00 h e 18:00 h. O procedimento somente considerará **steps** dentro deste limite, com os intervalos determinados nos **steps**, descartando-se as descrições inválidas.

4.3.1 Determinação da EALN Através do DLC

Aqui o procedimento é bastante simples e segue o modelo clássico descrito.

O procedimento utiliza, além da **matriz da abóbada**, apenas a arquivo contendo a **matriz dos DLCs** de cada **direção / solo / PUs** associados a cada **vértice de análise**, que também é construído matricialmente, minimizando os tempos de acesso e leitura de dados repetitivos.

A cada lote de dados inscritos **na matriz da abóbada** é tomada cada distribuição de luminâncias e feita a pura conversão dos valores de luminância de cada **direção / solo / PUs**, multiplicando-se o **DLC** de cada **vértice de análise** para aquela **direção / solo / PUs** pelo valor da luminância, correspondendo à contribuição em lux da **direção / solo / PUs** naquela distribuição de céu para cada **vértice de análise**. A iluminância final em cada **vértice de análise** para aquela distribuição será a somatória das contribuições de todas as **direções / solo / PUs** calculadas segundo os **DLC**.

O resultado do procedimento, como descrito aqui, é uma matriz de valores de iluminância para cada **vértice de análise** resultante do cálculo de cada **step** válido, em lux, conforme a Fórmula 35:

$$EF_a = \sum_{i=0}^n DLC_{a,i} * Ld_i \quad (35)$$

Onde:

EF_a : é a iluminância final do vértice de análise **a**;

i: é o índice de uma direção específica da abóbada celeste;

n: é o número total de direções do hemisfério da abóbada, correspondente à metade do número de vértices do globo de cálculo;

DLC_{a,i}: é o Daylight Coefficient do vértice de análise **a** em relação à direção **i**

Ld_i: é a luminância da direção **i** para uma dada distribuição de luminâncias correspondente a um tipo de céu;

Neste procedimento do DLC são conhecidas apenas as iluminâncias finais de cada vértice de análise para cada data hora.

4.3.2 Determinação da EALN Através do CR

No procedimento que utiliza os **Coefficientes de Radiosidade** para determinação da **EALN**, um passo intermediário é acrescentado ao processamento dos **steps** após a definição de um lote da **matriz da abóbada**.

Acrescenta-se ao procedimento uma matriz que associa a cada **vértice protagonista** uma lista de iluminâncias iniciais. Para a determinação destas iluminâncias iniciais é utilizado o arquivo de Visibilidade do Céu, calculado durante a Visibilidade, o qual deu origem aos **Coefficientes de Radiosidade** dos **vértices protagonistas**. Para cada distribuição da **matriz da abóbada** é determinada então a iluminância inicial de cada **vértice protagonista** através da leitura do arquivo de céu, e também de cada **vértice de análise**. A determinação da iluminância final de cada **vértice de análise** correspondente à distribuição corrente é dada somando-se a sua iluminância inicial com a somatória dos produtos da iluminância inicial de cada **vértice protagonista** pelo **CR** do **vértice de análise** em relação ao **vértice protagonista**, conforme a Fórmula 36:

$$EF_a = EO_a + \sum_{v=0}^n CR_{a,v} * EO_v \quad (36)$$

Onde:

EF_a : é a iluminância final do vértice de análise a ;

EO_a : é a iluminância inicial do vértice de análise a ;

v : é o índice de um vértice protagonista opaco ou transmissor difuso específico do projeto;

n : é o número total de vértices protagonistas opacos ou transmissores difusos do projeto;

$CR_{a,v}$: é o Coeficiente de Radiosidade do vértice de análise a em relação ao vértice protagonista v ;

EO_v : é a iluminância inicial do vértice protagonista opaco ou transmissor difuso v ;

Neste procedimento, além da iluminância final de cada **vértice de análise** em cada distribuição da **matriz da abóbada** (como obtido através do DLC), é possível conhecer também a iluminância inicial de cada **vértice de análise**, além da iluminância inicial de cada **vértice protagonista**.

4.3.3 Determinação da EALN através da Radiosidade Plena

Neste procedimento a **matriz da abóbada** é associada também à matriz de iluminâncias nos **vértices de análise** e nos **vértices protagonistas** e os arquivos de visibilidade são usados plenamente, não existindo arquivos de coeficientes.

Para cada distribuição da **matriz da abóbada** o procedimento determina a iluminância inicial de cada **vértice de análise** e de cada **vértice protagonista**, utilizando os arquivos de Visibilidade do Céu calculados para o projeto.

No passo seguinte é então aplicada a equação da radiosidade para cada distribuição de iluminâncias iniciais dos **vértices protagonistas** no número de ciclos especificados, determinando-se então as suas iluminâncias finais para cada distribuição, utilizando-se aqui os arquivos de Fatores de Forma calculados durante a etapa de visibilidade, que relacionam os fluxos de troca entre os **vértices protagonistas**.

Por fim, para cada **vértice de análise**, em cada distribuição, é feita a somatória dos produtos entre a iluminância final de cada **vértice protagonista** e o Fator de Forma do **vértice de análise** em relação a ele, valendo-se também dos arquivos de Fatores de Forma, que é adicionada à iluminância inicial do **vértice de análise**, resultando em sua iluminância final, conforme a Fórmula 37.

$$EF_a = EO_a + \sum_{v=0}^n FTF_{a,v} * EF_v * rfl \quad (37)$$

Onde:

EF_a : é a iluminância final do vértice de análise a ;

EO_a : é a iluminância inicial do vértice de análise a ;

v : é o índice de um vértice protagonista opaco ou transmissor difuso específico do projeto;

n : é o número total de vértices protagonistas opacos ou transmissores difusos do projeto;

$FTF_{a,v}$: é o Fator de Forma do vértice de análise a em relação ao vértice protagonista v ;

EF_v : é a iluminância final do vértice protagonista opaco ou transmissor difuso v ;

rfl: é a refletância do vértice v .

Quando o vértice v é transmissor difuso é considerado na Fórmula 37 o produto da iluminância do lado visível pela refletância do vértice somado ao produto da iluminância do lado oposto pela transmitância do vértice. Nos dois casos anteriores esta particularidade está embutida no pré-cálculo dos coeficientes, seja o **DLC**, seja o **CR**.

Neste procedimento, tem-se acesso a todos os dados de cálculo para todos os **vértices protagonistas e de análise**, podendo-se destacar a Iluminância Inicial, nas componentes Difusa do Céu e Direta do Sol, e a Iluminância Final, representando uma completa descrição das condições de iluminação do ambiente para cada data / hora simulada.

4.4 PROPOSIÇÕES DE VERIFICAÇÃO

Para cada uma destas conceituações foi elaborado um método de verificação específico, os quais serão descritos no próximo capítulo, assim como serão apresentados e comentados os resultados de cada verificação. O primeiro método de verificação visa avaliar a consistência de conversão dos dados para caracterização das grandezas luminosas, no caso de aplicação das fórmulas de eficiência luminosa quando os arquivos climáticos não trazem estas informações. O segundo método refere-se à análise dos descritores calculados e o procedimento de seleção dos modelos de céu e determinação das luminâncias do Zenith em cada *step*. Aqui neste segundo método também será verificada a consistência do procedimento de sucessão de cálculos de datas / horas comparados aos procedimentos de cálculos estáticos já validados no programa, usando-se a determinação da **EALN** através do **DLC**. Não serão testados os outros dois procedimentos porque a hipótese é que as três abordagens conduzem a resultados iguais ou praticamente iguais, e a abordagem que não estiver de acordo com o conceito conduzirá a resultados diferentes, devendo ser revisada, o que aconteceu durante o desenvolvimento do trabalho associado a erros na programação, que foram corrigidos ao longo das verificações. Assim, não houve necessidade de testar as outras duas abordagens, **CR** e **Radiosidade Plena**, quanto ao encadeamento. O terceiro método de verificação refere-se ao estudo comparativo de cada uma das 3 abordagens propostas para determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – **EALN**, quanto aos resultados obtidos e aos tempos de processamento em cada abordagem.

5 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MÉTODOS

A verificação dos conceitos foi dividida em 4 etapas, conforme descrito ao final do capítulo anterior, sendo que neste capítulo serão descritos, para cada uma das 4 etapas: a) o procedimento de verificação proposto; b) os dados utilizados; c) os resultados obtidos; d) comentários sobre os resultados, os quais servirão de base para as conclusões do trabalho no próximo capítulo.

As etapas de verificação são as seguintes:

a) Verificação da consistência das conversões dos dados de radiação em dados luminosos utilizando as fórmulas de eficiência luminosa propostas por Perez (PEREZ et al,1990).

b) Verificação do algoritmo de interpretação dos dados luminosos e seleção do tipo de céu e cálculo da Luminância do Zenith em cada **step**.

c) Verificação da consistência do encadeamento de cálculo na determinação da EALN através do DLC, comparado às simulações estáticas já validadas.

d) Verificação da coerência de resultados de cálculos da EALN obtida através dos três diferentes conceitos propostos, assim como um estudo comparativo entre os tempos totais de processamento entre os três procedimentos programados.

5.1 VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DAS CONVERSÕES DE RADIAÇÃO EM ILUMINAÇÃO

A fim de avaliar se as fórmulas usadas pelo Apolux na conversão dos dados de radiação fornecidos pelos arquivos climáticos para dados de iluminação são coerentes e conferem com os dados de iluminação recentemente disponibilizados nos arquivos climáticos do LABEEE³⁰, foram geradas planilhas de comparação.

O objetivo desta verificação é avaliar a capacidade do procedimento proposto de lidar com arquivos climáticos que não contenham os dados de luminosidade necessários à determinação dos modelos de céu conforme a Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E.

Foram selecionados 27 arquivos climáticos de diferentes cidades brasileiras fornecidos pelo LABEEE, que possuem dados de iluminação, e aplicadas as fórmulas de eficácia luminosa do Modelo de Perez et al (1990) programadas no Apolux.

São elas: Aracaju, Belém, Belo Horizonte, Boa Vista, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Curitiba, Florianópolis, Fortaleza, Goiânia, João Pessoa, Macapá, Maceió, Manaus, Natal, Palmas, Porto Alegre, Porto Velho, Recife, Rio Branco, Rio de Janeiro, Salvador, São Luis, São Paulo, Teresina e Vitória.

Como teste adicional, foram selecionados no site do Software Energy Plus³¹ arquivos EPW correspondentes a 10 das 27 cidades brasileiras estudadas no primeiro grupo, e feito o mesmo procedimento. São elas: Belém, Belo Horizonte, Boa Vista, Brasília, Cuiabá, Curitiba, Florianópolis, Manaus, Salvador e São Paulo.

Ainda um terceiro conjunto de testes foi feito com 6 cidades de diferentes países para testar a consistência do modelo adotado em relação a outras localidades que não as brasileiras. São elas: Cairo, New Delhi, New York, Paris, Sidney e Tóquio.

Essa conversão gerou para cada cidade uma planilha de dados na qual quatro colunas continham os dados de Iluminância Horizontal Global (IGlb), Iluminância Horizontal Difusa (IDifHor), Iluminância Direta Normal (IDir-Norm) e Luminância do Zenith(LumZenit), conforme calculadas com as fórmulas de eficácia luminosa, outras 4 colunas continham os mesmos dados conforme registrados no arquivo EPW e um conjunto de 4 colunas contendo a razão entre o valor

³⁰ Arquivos climáticos obtidos no site do LABEEE: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>

³¹ Disponíveis no site:

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm?CFID=3462610&CFTOKEN=963e901fad598ebb-637CFA9B-CD5B-3F68-4511BD9525E04BD3&jsessionid=D5BEDA79F1C87FF98B6AE037A31F8AEB.eere

do EPW e o valor calculado. Um fac-simile de uma das planilhas está exemplificado em duas partes nas Figuras 50-a e 50-b

Figura 50-a: Parte inicial da planilha de verificação, contendo os dados horários do EPW.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Belo Horizonte (Pampulha) MG BRA																	
2	lat:	-19,82	long:	43,96	alt:	869,00												
3																		
4	STEP	mes	dia	hora	TempSol	H.NASC	H.POENT	SOLAZM	SOLANG	REXHor	REXDirNo	RGLbHor	RDirNorm	RDirHor	clearness	Brightnes	AtmPrecv	categoria
5	0	1	1	1	0,007	5,412	18,588											
6	1	1	1	2	1,007	5,412	18,588											
7	2	1	1	3	2,007	5,412	18,588											
8	3	1	1	4	3,007	5,412	18,588											
9	4	1	1	5	4,007	5,412	18,588											
10	5	1	1	6	5,007	5,412	18,588	-57,30	90,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
11	6	1	1	7	6,007	5,412	18,588	111,79	82,28	188,00	25,00	6,00	0,00	6,00	1,002111	1,629660	3,735942	0
12	7	1	1	8	7,007	5,412	18,588	107,92	69,00	504,00	180,00	120,00	1,00	116,00	1,040193	0,885508	3,363560	0
13	8	1	1	9	8,007	5,412	18,588	104,91	55,46	799,00	452,00	306,00	29,00	256,00	1,127470	0,580057	3,114286	1
14	9	1	1	10	9,007	5,412	18,588	102,79	41,76	1053,00	784,00	462,00	86,00	347,00	1,456606	0,412406	3,532480	2
15	10	1	1	11	10,007	5,412	18,588	102,06	27,97	1247,00	1100,00	663,00	246,00	384,00	2,274264	0,283520	3,684003	4
16	11	1	1	12	11,007	5,412	18,588	105,81	14,23	1369,00	1326,00	849,00	490,00	343,00	2,563963	0,250691	3,459071	4
17	12	1	1	13	12,007	5,412	18,588	181,65	3,24	1411,00	1409,00	889,00	545,00	343,00	2,791329	0,228199	3,507838	4
18	13	1	1	14	13,007	5,412	18,588	254,32	14,42	1369,00	1326,00	889,00	559,00	312,00	4,525294	0,163052	3,410981	6
19	14	1	1	15	14,007	5,412	18,588	257,94	28,16	1247,00	1100,00	998,00	706,00	197,00	2,005993	0,280968	3,735942	4
20	15	1	1	16	15,007	5,412	18,588	257,18	41,94	1053,00	784,00	657,00	295,00	261,00	2,300825	0,230300	4,178699	4
21	16	1	1	17	16,007	5,412	18,588	255,05	55,65	799,00	452,00	582,00	251,00	137,00	1,004530	0,396500	3,410981	0
22	17	1	1	18	17,007	5,412	18,588	252,04	69,18	504,00	180,00	117,00	1,00	113,00	1,006537	0,803068	4,063319	0
23																		

Fonte: Autoria própria

Figura 50-b: Parte final da planilha de verificação, contendo os dados horários do EPW.

	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	
1																								
2																								
3																								
4	IGlb	IDirNorm	IDirHor	LumZenit	IGlb(EPW)	IDirNorm	IDirHor	El	LumZenit	DivIGlb	DivDirNc	DivDirHc	DivLumZc	Turv	Razão D/g	TipocEu	IGlb	IDirNorm	IDirHor	LumZenit	DivIGlb	DivDirNc	DivDirHc	DivLumZc
5					0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!									#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
6					0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!									#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7					0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!									#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
8					0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!									#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
9					0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!									#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
10					0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!									#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
11	11033,46	155,84	10762,72	-3537,88	13193	103	12865	3338	1,195726	0,660934	1,19533	-0,9435	8,48	0,60	14	11542,54	369,52	11492,54	1079,09	1,142989	0,27874	1,119422	3,093347	
12	30677,29	3654,51	25867,73	2305,23	33905	2812	28698	6680	1,105215	0,76946	1,109413	2,897759	13,01	0,54	6	23313,26	3636,16	22003,79	5721,30	1,454323	0,773343	1,30423	1,167567	
13	51588,40	8024,25	39310,66	8955,46	50395	8203	39536	11222	0,976867	1,022276	1,005732	1,25309	15,95	0,52	5	44575,27	0,00	44575,27	13930,92	1,13056	#DIV/0!	0,886949	0,805546	
14	73354,91	21681,78	45722,50	12432,02	72908	23825	44511	14614	0,993908	1,098849	0,973503	1,175513	13,53	0,46	6	61520,89	21842,84	45347,22	15029,79	1,185093	1,090746	0,98156	0,972336	
15	93730,13	43999,39	45421,38	17004,58	93696	47422	42076	13140	0,999636	1,077788	0,926348	0,772733	9,78	0,38	14	79011,71	44387,46	40151,48	13938,49	1,18585	1,068365	1,047931	0,942713	
16	99690,49	49613,68	45293,25	30117,72	98881	52813	42335	13042	0,99188	1,064485	0,934687	0,433034	9,57	0,35	14	86280,63	49425,37	38189,92	25848,16	1,146039	1,06854	1,108339	0,504562	
17	100830,91	50875,64	41779,82	45733,48	99031	54180	38975	11886	0,982149	1,06495	0,932867	0,259897	9,60	0,31	14	119736,34	50833,02	68942,02	77687,60	0,827076	1,065843	0,56533	0,152997	
18	108822,41	72523,88	24081,94	15556,04	105273	71298	24201	6395	0,967383	0,983097	1,004944	0,411094	5,90	0,19	12	98267,69	72189,49	28027,55	18523,00	1,071288	0,987651	0,863472	0,345246	
19	72624,48	26432,16	34708,25	12841,39	69654	28201	31790	8248	0,959098	1,06692	0,915921	0,642298	14,23	0,29	8	89752,16	26619,04	66447,78	19474,15	0,77607	1,05943	0,478421	0,423536	
20	65282,97	21979,99	19655,31	4191,16	60322	23588	17553	2767	0,924008	1,073158	0,893041	0,660199	13,39	0,20	8	64033,60	22078,96	47685,09	12065,17	0,942037	1,068347	0,368102	0,229338	
21	12868,80	82,87	12507,37	4092,84	12462	101	12126	2921	0,968389	1,218776	0,969508	0,713685	41,29	0,17	0	12508,07	0,00	12508,07	5106,71	0,996317	#DIV/0!	0,969454	0,571993	
22	5948,13	112,46	5485,82	693,47	5640	213	5221	0	0,948197	1,894007	0,951726	0	24,58	0,12	1	5525,92	0,00	5525,92	2102,20	1,020645	#DIV/0!	0,94482	0	

Fonte: Autoria própria

Partindo-se de planilhas geradas na conversão foram eliminadas as linhas com dados inconsistentes (horários noturnos) e gerados gráficos das razões EPW / Apolux para cada uma das grandezas: Iluminâncias Global, Difusa, Direta e Luminância do Zenith.

Devido ao grande número de dados, os gráficos foram separados por meses, tomando-se apenas 4 meses do ano - Janeiro, Abril, Julho e Outubro - gerando-se para cada mês, em cada cidade, um gráfico de todas as horas de cada dia de acordo com o ângulo solar com o Zenith (Z). Nos gráficos, a escala equivalente ao valor 1 significa que ambos os valores coincidiram, aumentando a divergência conforme o valor aumenta (valor do EPW é maior) ou diminui (valor do EPW é menor).

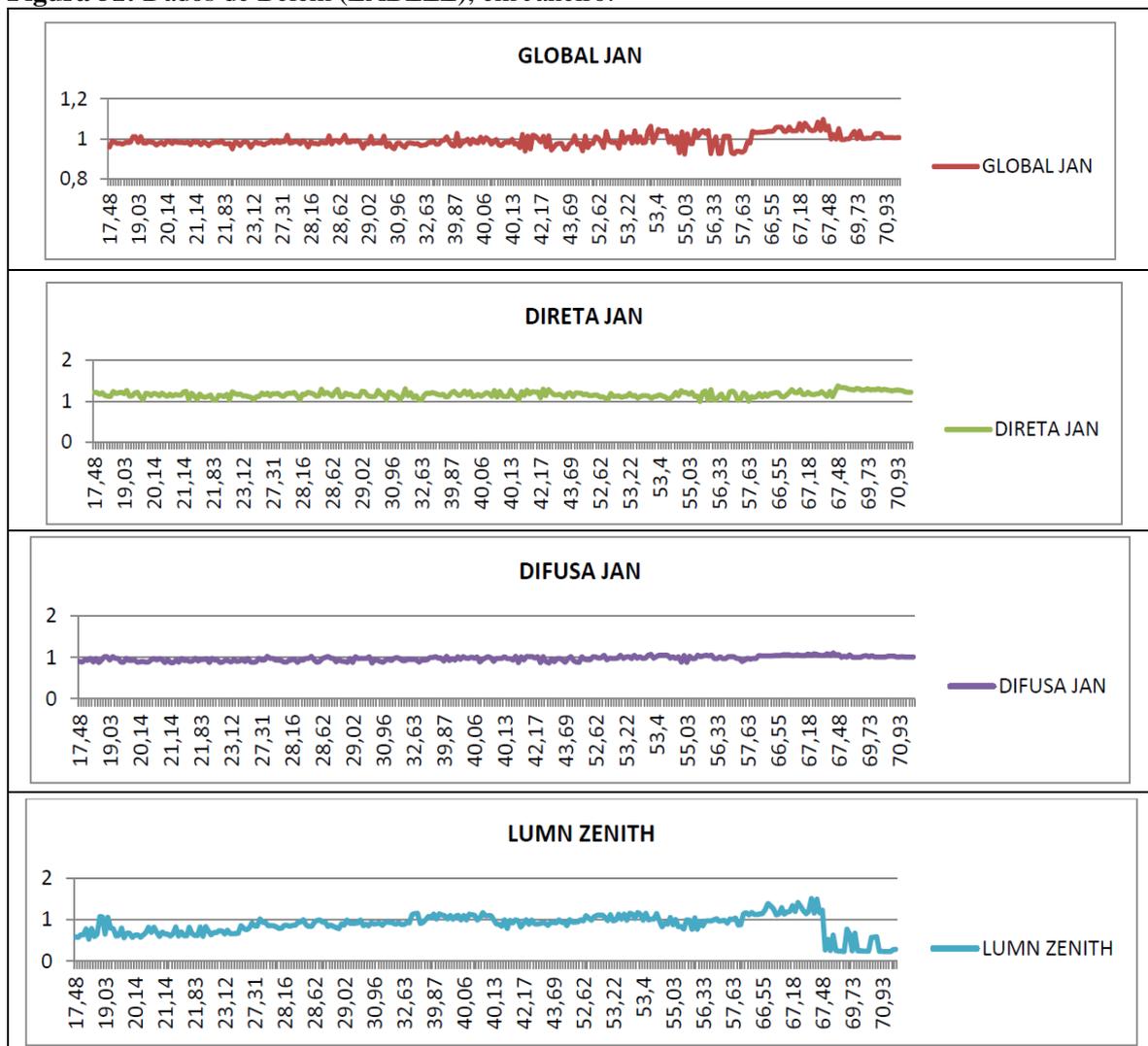
Observe-se que o gráfico organiza-se segundo uma representação mensal onde foram anotados, a cada dia, o ângulo solar e representado no mesmo ângulo todos os dias do mês, tendo o efeito prático de uma superposição do gráfico diário de ângulos ao longo de todo o mês.

No Anexo A, em função da grande quantidade de dados e considerando que os resultados foram muito similares em todos os arquivos estudados, estão colocados os gráficos apenas da cidade de Belém, escolhida como exemplo. O conjunto completo de gráficos e planilhas estudados

na conversão encontra-se no DVD anexo, na Pasta “1 - CONVERSÃO DOS DADOS DE RADIAÇÃO “ com os gráficos e planilhas de todas as cidades citadas no início deste tópico.

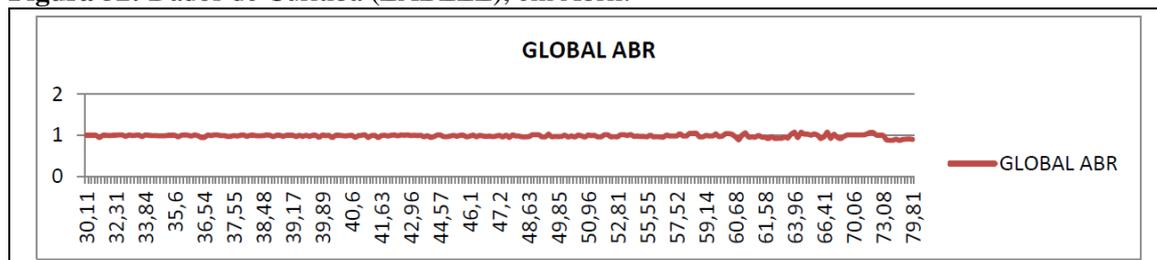
Colocamos a seguir alguns os gráficos de algumas cidades e para alguns meses, para melhor compreensão e visualização dos resultados no corpo deste texto: a) Belém, em Janeiro, com arquivo do LABEEE (Figura 51); b) Curitiba, em Abril, com arquivo do LABEEE (Figura 52); c) Florianópolis, em Julho, com arquivo do LABEEE (Figura 53); d) Florianópolis, em Julho, com arquivo do Energy Plus (Figura 54); e) Tóquio, em Julho, com arquivo do Energy Plus (Figura 55).

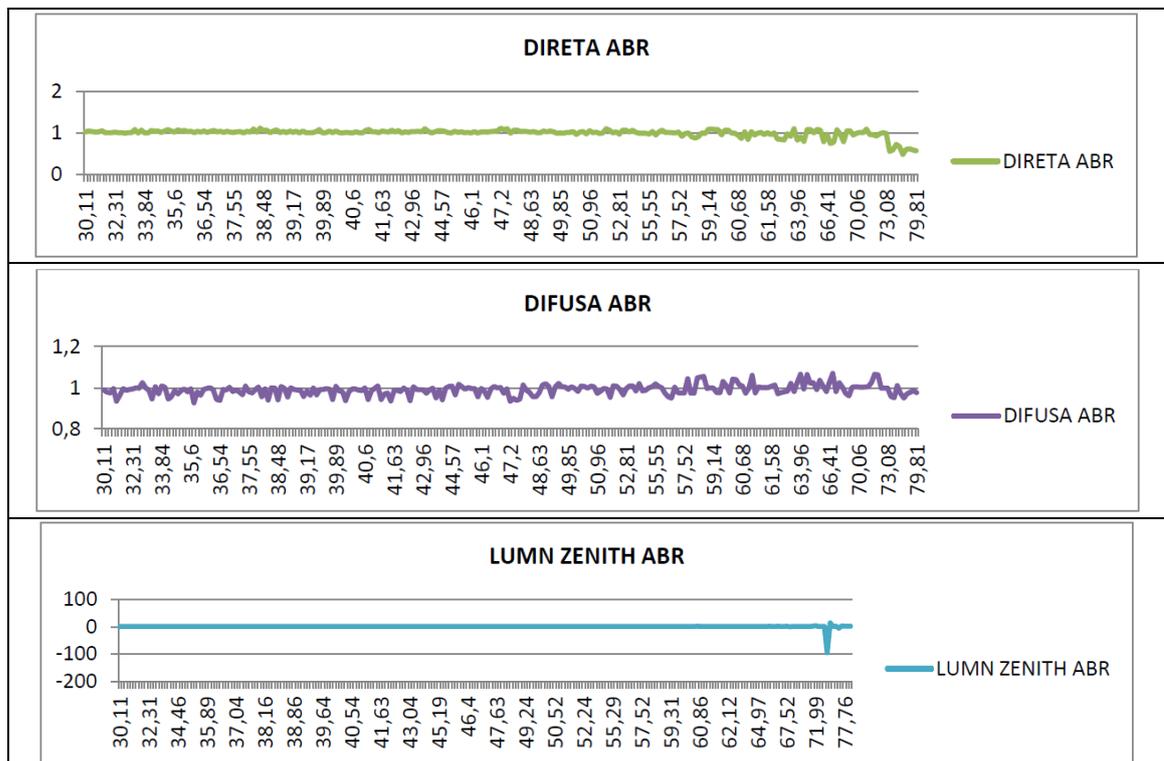
Figura 51: Dados de Belém (LABEEE), em Janeiro.



Fonte: Autoria própria.

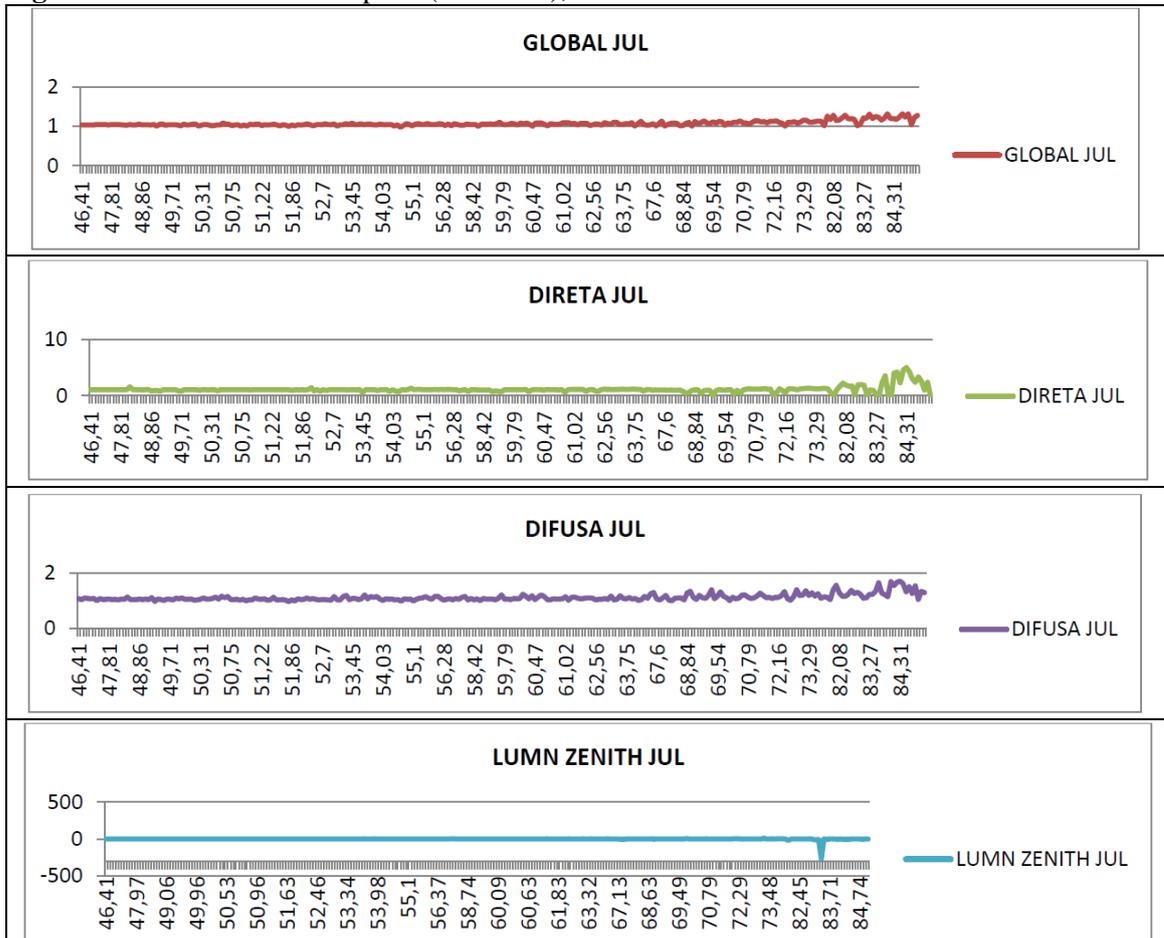
Figura 52: Dados de Curitiba (LABEEE), em Abril.





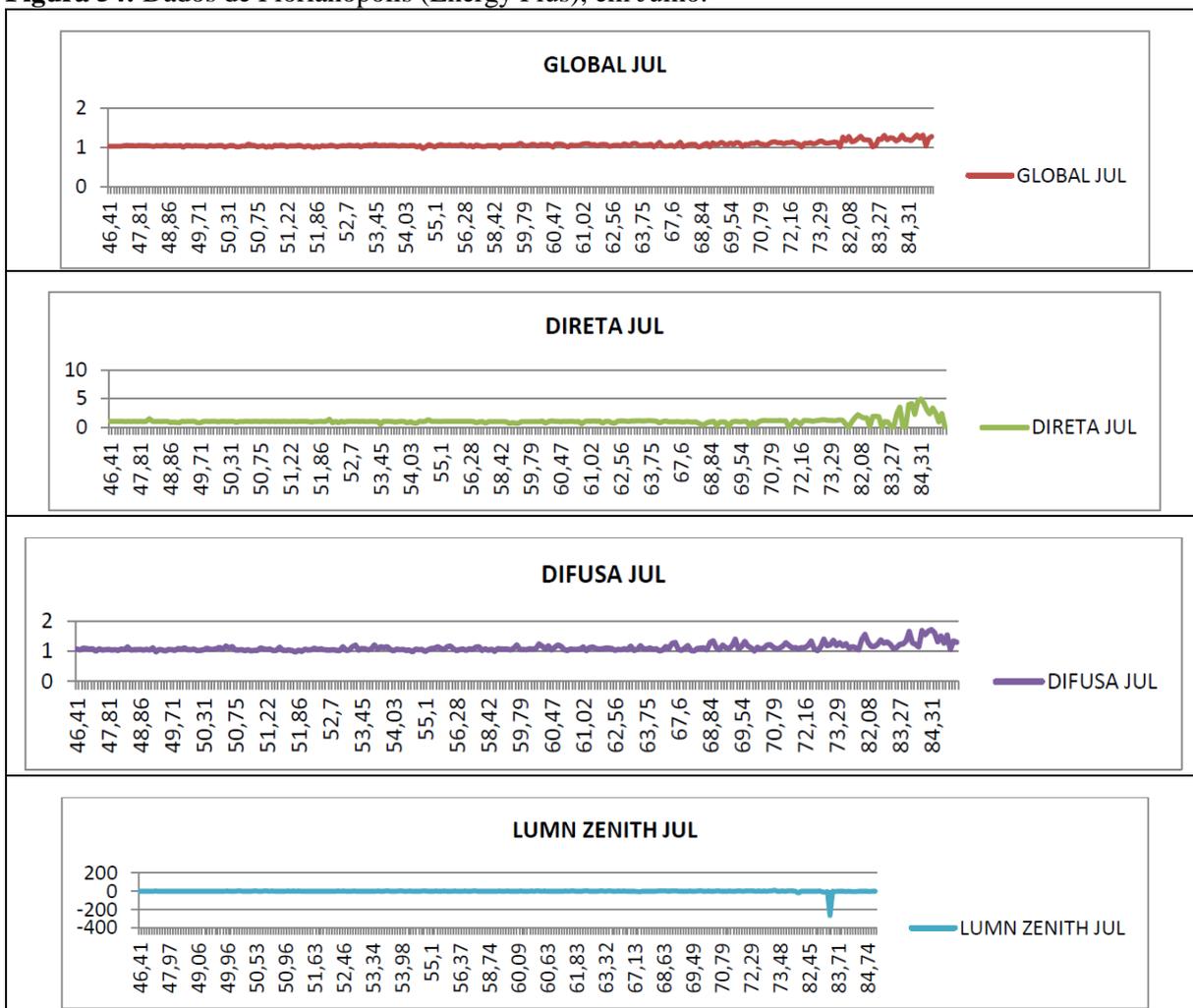
Fonte: Autoria própria.

Figura 53: Dados de Florianópolis (LABEEE), em Julho.



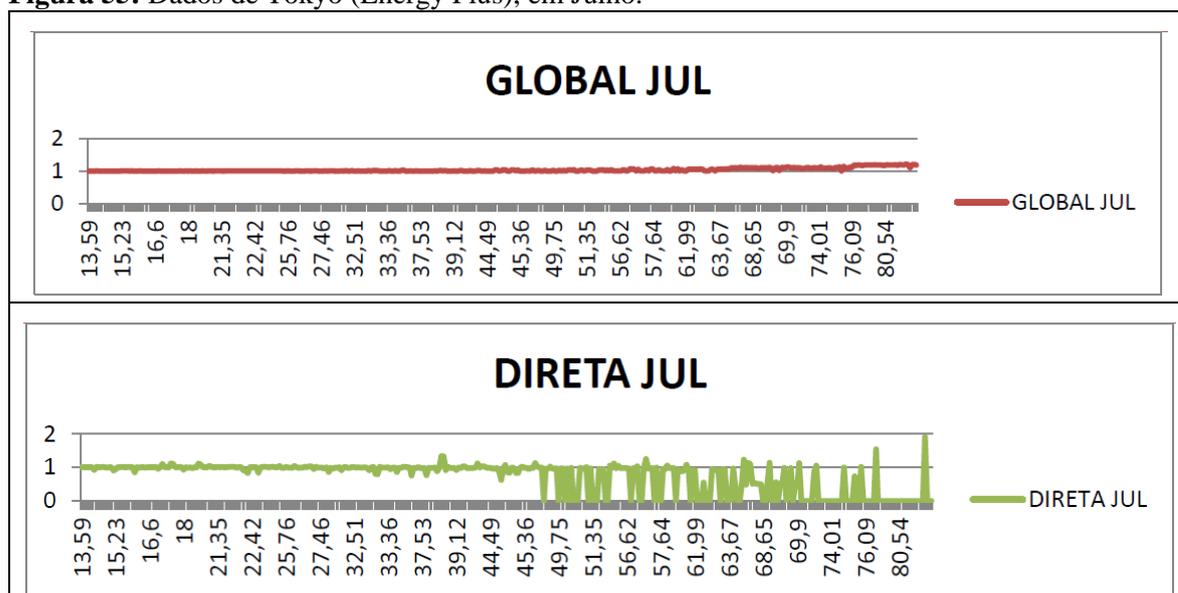
Fonte: Autoria própria.

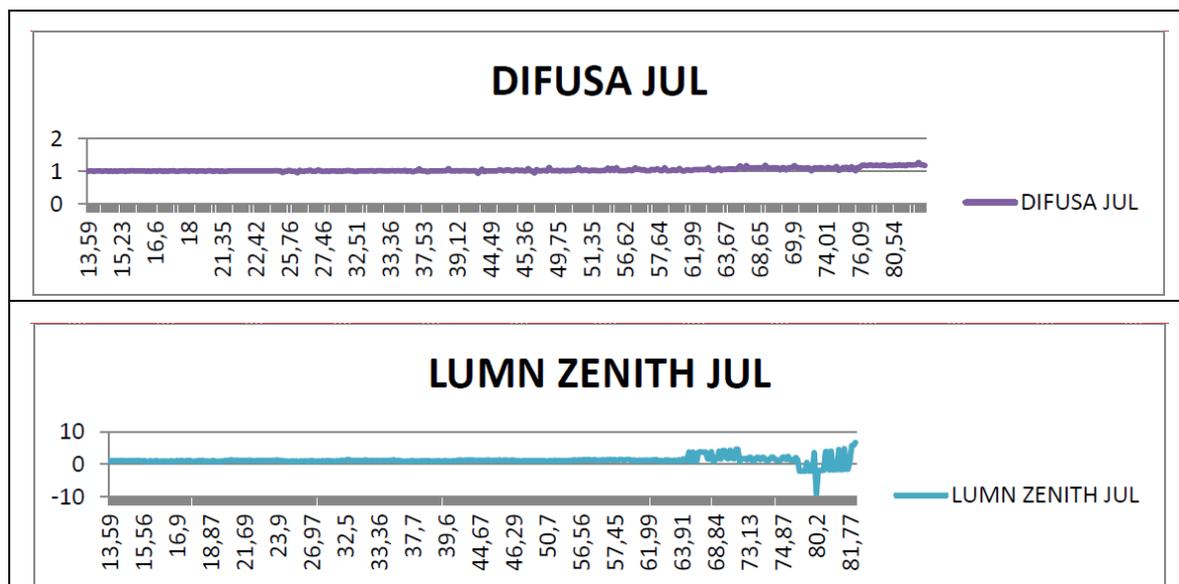
Figura 54: Dados de Florianópolis (Energy Plus), em Julho.



Fonte: Autoria própria.

Figura 55: Dados de Tokyo (Energy Plus), em Julho.





Fonte: Autorial própria.

A análise dos resultados demonstrou uma consistência bastante grande na conversão da Radiação Global Horizontal em Iluminância Global Horizontal, consistência que se verificou também em escala um pouco menor na conversão da Iluminância Difusa Horizontal.

Na Iluminância Global, as divergências raramente atingiram cerca de 10%, sendo que estas diferenças mais significativas ocorreram particularmente nos ângulos solares zenitais elevados (Sol próximo do horizonte). Esta consistência verificou-se tanto com os dados dos arquivos fornecidos pelo LABEEE como nos fornecidos pelos arquivos do Energy Plus, e verificou-se tanto nas cidades brasileiras quanto nas estrangeiras. No entanto, nestas últimas, houve maior discrepância entre os valores nos ângulos zenitais maiores (em geral acima de 75 graus), chegando em alguns poucos casos a cerca de 50% de diferença.

Há que se observar, entretanto, que estas grandes diferenças ocorrem em razões que utilizam valores absolutos bem menores, com o Sol já próximo do horizonte, diminuindo significativamente a diferença para posições mais elevadas do Sol, onde os valores absolutos são maiores. As mesmas observações valem para as Iluminâncias Difusas. Este desvio, portanto, deve influir menos significativamente nas análises de todo o conjunto de horas.

Embora com amplitude menor de divergência, no caso das cidades brasileiras também se verificou maior discrepância nos ângulos zenitais maiores, acima de 70 ou 75 graus, sendo que quando utilizados os arquivos do Energy Plus, os valores de discrepância maiores ocorreram também com ângulos menores, mas dentro da mesma margem de divergência.

Como a análise acima foi de característica visual e baseada em um mês, realizou-se ainda uma análise numérica com base no conjunto anual de valores anuais, através de Médias e Desvios Padrões.

Para esta análise tomamos as cidades de Belém (ao Norte), Brasília (Centro – Oeste) e Florianópolis (Sul).

Para cada uma foi analisada toda a série de valores considerados válidos no intervalo anual (em torno de 4.000 horas, aproximadamente). Foram considerados separadamente os valores de Iluminância Horizontal Global (GLB) e Difusa (DIFU) inscritas no arquivo EPW (indicadas como (EW)) e calculadas pelo APOLUX (AX). A partir dos valores absolutos foi calculado um índice de Divergência (Div), expresso pela razão EW / AX entre os valores horários do EPW e os calculados pelo APOLUX, assim como a Diferença Absoluta $EW - AX$ (dif) entre os valores horários do EPW e do APOLUX. A partir destes indicadores horários foram então determinados os valores da Média e do Desvio Padrão de cada grandeza EW e AX assim como da Divergência e da Diferença Absoluta. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 19.

Tabela 19: Desvio Padrão e Média entre valores absolutos e relativos de Iluminância Global e Difusa para Belém – Pa, Brasília – DF e Florianópolis – SC.

LOCAL	INDICADOR	EPW (EW)	APOLUX (AX)	EW / AX	EW - AX
BELÉM		GLB(EW)	GLB(AX)	DivGLB	DifGLB
	Média	49592	50681	0,990403	-1089
	DesvPD	27398	28463	0,030474	1389
		DIFU(EW)	DIFU(AX)	DivDIFU	DifDIFU
	Média	30141	32018	0,959987	-1877
	DesvPD	13239	14876	0,057631	2255
BRASÍLIA		GLB(EW)	GLB(AX)	DivGLB	DifGLB
	Média	53496	54157	0,993497	-660
	DesvPD	30167	30618	0,039383	1253
		DIFU(EW)	DIFU(AX)	DivDIFU	DifDIFU
	Média	26239	26446	0,998448	-207
	DesvPD	11184	11621	0,038530	799
FPOLIS		GLB(EW)	GLB(AX)	DivGLB	DifGLB
	Média	47996	48903	0,995515	-907
	DesvPD	28711	29504	0,069570	1701
		DIFU(EW)	DIFU(AX)	DivDIFU	DifDIFU
	Média	25566	25975	0,998696	-409
	DesvPD	11533	12169	0,062627	1136

Fonte: Autoria Própria

Os valores obtidos para a divergência mostram valores inferiores a 1 %, observando-se que os valores calculados foram maiores um pouco que os inscritos no arquivo EPW. Quanto ao desvio padrão, observa-se também que os valores situaram-se entre 3% e 6,3%, que podem ser considerados baixos, dentro de um valor bastante aceitável perto dos erros mencionados na bibliografia revista, mencionada entre cerca de 6% e 25%.

Os resultados destes testes mostram a viabilidade de se utilizar os dados convertidos, quando eles não estão presentes diretamente no arquivo climático, podendo-se supor que não se implicaria num erro maior que cerca de 10%.

Os resultados também são importantes para analisar, quando utilizados os dados convertidos, a consistência da relação “**Global = Direta + Difusa**”. Desta forma, prioriza-se o valor da **Global** como mais correto, utilizando-se prioritariamente o valor da **Difusa** para definição da **Direta** quando houver inconsistência na soma destes dois valores em relação à Global. Observe-se que o termo “Direta”, nesta relação, refere-se à Iluminância Direta Horizontal, obtida a partir da Direta Normal multiplicada pelo cosseno do ângulo solar com o Zenith.

Pelo conjunto de testes realizados concluiu-se pela melhor abordagem como sendo a utilização dos valores de conversão da Iluminância Global Horizontal e Iluminância Difusa Horizontal como os valores mais consistentes, determinando-se a partir deles a Iluminância Direta Horizontal. A mesma abordagem será utilizada quando os arquivos tiverem os valores de Iluminâncias já disponíveis, tomando-se como prioritários os mesmos valores.

Devido ao grande número de planilhas e ao tamanho de cada uma não foram anexados no corpo do texto impresso as planilhas, sendo que foram anexadas no formato digital em um DVD, na pasta “1 – CONVERSÃO DOS DADOS DE RADIAÇÃO”.

5.2 VERIFICAÇÃO DO ALGORITMO DE INTERPRETAÇÃO DOS DADOS LUMINOSOS E SELEÇÃO DO TIPO DE CÉU

Para verificar a consistência do método de seleção dos tipos de céu, aplicamos o procedimento de conversão aos arquivos EPW, gerando planilhas correspondentes a diferentes localidades do Brasil e do Mundo com os dados de iluminação, conforme os locais e arquivos estudados na primeira etapa de verificação, no item 5.1.

Sobre os dados calculados foi aplicado o modelo de seleção do tipo de céu, conforme descrito na Metodologia no tópico 4.1, determinando-se para cada *step* os descritores:

a) Turvamento **Tv**.

b) Razão entre a iluminância difusa horizontal (Dv) e a iluminância extraterrestre (Ev): **Dv / Ev**

Ev

c) Brilho Δ (delta)

O procedimento seguiu a avaliação indicada na Tabela 17, determinando-se em cada *step* e para cada tipo de céu o atendimento a cada um dos 3 descritores. No **Anexo B** está o conjunto de intervalos de cada um dos descritores relativos a cada tipo de céu. A verificação foi feita diferenciando-se um índice de atendimento aos coeficientes variando do índice 0 (não atende a nenhum coeficiente) até o índice 7 (atende os 3 coeficientes), com valores intermediários atendendo a um ou dois dos coeficientes, conforme a Tabela 17.

Este passo gera, para cada *step*, uma lista de tipos de céu atendidos e o índice de atendimento. Podemos ter, por exemplo, um *step* que atende a 2 tipos de céu nos 3 coeficientes, e mais dois tipos com dois coeficientes, sendo diferentes estes dois em cada caso.

A partir deste índice o procedimento vai tomando, sucessivamente, os atendimentos aos descritores conforme estipulado no tópico 5.1 da Metodologia, aplicando-se então a determinação dos valores da luminância do Zenith conforme o método descrito para cada tipo de céu atendido. A partir desta luminância do Zenith e coerente com cada tipo de céu, o procedimento calcula então a distribuição de luminâncias na abóbada e calcula, utilizando também o valor adotado para a iluminância direta do Sol, o valor da iluminância global. O procedimento compara, então, os valores obtidos com os valores inicialmente calculados com a conversão e escolhe o tipo de céu que gera o resultado mais próximo da referência inicial.

Quando a lista é apenas de tipos de céu com dois coeficientes atendidos, o procedimento é o mesmo, comparando-se os resultados também.

Quando a lista envolve atendimento a apenas 1 coeficiente nos diferentes tipos de céu, da mesma forma o cálculo se realiza e se escolhe o mais próximo do resultado inicial.

Para exemplo, temos na Figura 56 um *fac-simile* de uma das planilhas geradas.

Figura 56 (a)(b): Fac-simile de um segmento com algumas linhas da Planilha de Seleção dos Tipos de Céu obtida para Florianópolis / LABEEE.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	FLORIANOPOLIS_ARPT - BRA																					
2	lat:	-27,67	long:	48,55	alt:	5																
3																						
4	STEP	mes	dia	hora	SOLANG:	RGlbHor	RDirNorm	RDifHor	Raz:(RDH	clearness	categoria	IGlb	IDirNorm	IDifHor	LumZenit	Raz:(DH - Turv	Razão D/E	Brilho DT	NumTipo	TipoCeu	IDifHor	
5	5	1	1	6	83,22	10	6	9	0,97	1,15913	1	1106,5	410,07	996,84	-6,56	0,94	7,46	0,06	1,4	5(C)	7(1)	5560,58
6	6	1	1	7	70,7	58	5	57	1,01	1,029678	0	6042,89	380,64	5976,35	1405,88	1,01	19,58	0,14	0,53	1(B)	8(5)	26377,75
7	7	1	1	8	57,8	95	2	94	1	1,010284	0	10659	128,93	10603,81	3818,23	1	37,02	0,15	0,29	1	0(3)	10607,05
8	8	1	1	9	44,67	332	141	244	1,04	1,387012	2	37017,48	11874,75	29813,65	7491,76	1,03	17,18	0,31	0,39	3	1(3)	29686,76
9	9	1	1	10	31,4	568	174	431	1,02	1,344651	2	63062,02	14680,64	51725,24	17548,83	1,02	18,78	0,45	0,45	3	1(3)	50840,24
10	10	1	1	11	18,18	645	223	442	1,01	1,488285	2	72887,41	19036,58	53676,3	26606,49	0,98	18,43	0,42	0,36	3	1(3)	52278,89
11	11	1	1	12	6,14	687	289	404	1,01	1,714431	3	78197,3	23661,15	53132,03	43204,73	0,98	17,13	0,4	0,29	3	1(7)	58837,88
12	12	1	1	13	10,55	297	111	187	1	1,589748	3	35639,89	9369,82	26310,21	16047,4	1	26	0,2	0,14	2	0(7)	26317,75
13	13	1	1	14	23,46	509	118	397	0,99	1,277397	2	57993,05	9929,51	49081,04	20160,78	1	23,74	0,4	0,32	2	0(3)	49093,64
14	14	1	1	15	36,73	565	365	250	0,96	2,146686	4	63143,47	31584,14	35383,14	9027,54	0,96	11,53	0,33	0,26	3	7(7)	39950,14
15	15	1	1	16	49,96	328	87	265	0,98	1,194236	1	37129,32	7635,92	30790,49	8431,83	0,96	18,39	0,36	0,4	5	1(3)	30608,29
16	16	1	1	17	63,02	116	86	69	0,93	1,522602	3	13054,96	6610,25	9867,68	1398,64	0,99	13,69	0,16	0,19	2(C)	5(1)	11234,96
17	17	1	1	18	75,78	122	108	84	0,91	1,377216	2	12861,72	6570,41	10027,28	1844,76	0,91	7,57	0,31	0,68	5	7(7)	10395,57
18	29	1	2	6	83,34	10	5	9	0,96	1,132151	1	1102,5	351,85	990,51	-22,48	0,94	7,54	0,06	1,48	5(C)	7(1)	5486,91
19	30	1	2	7	70,82	116	0	116	1	1	0	11339,17	0	11436,16	-171,63	1,01	30,16	0,26	1,1	2	0(3)	11439,59
20	31	1	2	8	57,92	227	71	196	1,03	1,174527	1	25541,14	6303,29	22446,66	4793,36	1,01	16,23	0,32	0,6	3	1(3)	22517,77

(a) Parte Inicial

	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK
1																		
2																		
3																		
4	NumTipo	TipoCeu	IDifHor	DivIDifHo	TipoCeu	IDifHor												
5	5 (C)	7 (1)	5560,58	5,58	9 (1)	6221,05	6,24	12 (1)	10411,27	10,44	13 (1)	10338	10,37	14 (1)	9578,09	9,61	7	4,578
6	1 (B)	8 (5)	26377,75	4,41	8	3,414												
7	1	0 (3)	10607,05	1	0	0												
8	3	1 (3)	29686,76	1	5 (7)	33285,86	1,12	8 (7)	55606,32	1,87	1	0,004						
9	3	1 (3)	50840,24	0,98	3 (7)	50790,75	0,98	8 (7)	79802,21	1,54	1	0,017						
10	3	1 (3)	52278,89	0,97	3 (7)	52283,66	0,97	8 (7)	97406,3	1,81	3	0,026						
11	3	1 (7)	58837,88	1,11	5 (7)	64366,41	1,21	8 (7)	125230,1	2,36	1	0,107						
12	2	0 (7)	26317,75	1	1 (3)	26846,94	1,02	0	0									
13	2	0 (3)	49093,64	1	1 (3)	48575,15	0,99	0	0									
14	3	7 (7)	39950,14	1,13	9 (7)	46756,9	1,32	14 (7)	45547,42	1,29	7	0,129						
15	5	1 (3)	30608,29	0,99	2 (3)	30793,45	1	3 (7)	30576,67	0,99	4 (3)	30796,42	1	8 (7)	51184,19	1,66	2	0
16	2 (C)	5 (1)	11234,96	1,14	7 (1)	28782,9	2,92	5	0,139									
17	5	7 (7)	10395,57	1,04	9 (3)	11277,4	1,12	12 (3)	19558,6	1,95	13 (3)	18876,53	1,88	14 (3)	16391,83	1,63	7	0,037
18	5 (C)	7 (1)	5486,91	5,54	9 (1)	6166,71	6,23	12 (1)	10272,12	10,37	13 (1)	10210,32	10,31	14 (1)	9510,36	9,6	7	4,539
19	2	0 (3)	11439,59	1	1 (3)	11545,72	1,01	0	0									
20	3	1 (3)	22517,77	1	5 (3)	25498,79	1,14	8 (7)	36349,57	1,62	1	0,003						

(b) Parte Final

Fonte: Autoria própria

Na planilha, onde cada linha representa uma data/ hora válida em termos de luz natural, a coluna **K** indica a categoria de brilho para as fórmulas de conversão e a coluna **N** a Iluminância Difusa Horizontal – **IDh** – calculada pela fórmula de eficiência luminosa ou extraída diretamente do arquivo. Esta grandeza foi escolhida porque o modelo de céu somente gera as luminâncias difusas da abóbada. Após a aplicação da conversão luminosa é calculado o Turvamento **Tv**, a Razão de Brilho **Dv/Ev**, e o Coeficiente de Brilho **Δ**, conforme descrito na Metodologia (4.1). Estes valores estão alocados nas colunas **Q**, **R** e **S**. Na coluna **T** está indicado o número de tipos de céu aos quais os descritores atenderam. Quando o número é seguido da indicação B ou C, significa que não atendeu, em nenhum dos tipos, aos 3 descritores, atendendo a apenas 2 no B e apenas 1 no C. Nos valores sem indicação, significa que pelo menos um dos tipos foi atendido nos 3 descritores. As colunas seguintes são arranjos de 3 colunas correspondentes a cada tipo atendido (destacadas em cores diferentes). Cada arranjo indica o tipo de céu atendido, com o índice de atendimento entre parênteses, a Iluminância Difusa Horizontal convertida e a razão entre a resultante do cálculo do tipo de céu a que foi associada e a convertida, indicando o desvio entre elas. Ao final de cada arranjo temos o céu escolhido com a diferença correspondente para mais ou para menos.

Tomemos como exemplo a linha 14:

a) Corresponde às 15 h do dia 1 de janeiro, com o Sol num ângulo de aproximadamente 36 graus com o Zenith.

b) A categoria (coluna **K**) de claridade para composição das fórmulas de conversão foi a de número 4, Iluminância Difusa Horizontal – **IDh** – foi de 35.383 lux (coluna **N**) e calculados **Tv** = 11.53, uma razão **Dv/Ev** = 0.33 e um Brilho **Δ** = 0.26 (colunas **Q**, **R** e **S**) e foram encontrados 3 tipos de céu (coluna **T**) sendo que pelo menos um deles atendeu aos 3 indicadores;

c) O primeiro céu foi o de número 7 e atendeu aos 3 indicadores (índice 7) (coluna **U**), a **IDh** – foi de 39.950 lux (coluna **V**) e a razão foi 1,13 (coluna **W**);

d) O segundo céu foi o de número 9 e atendeu aos 3 indicadores (índice 7) (coluna **X**), a **IDh** – foi de 46.756 lux (coluna **Y**) e a razão foi 1,32 (coluna **Z**);

e) O terceiro céu foi o de número 14 e atendeu aos 3 indicadores (índice 7) (coluna **AA**), a **IDh** – foi de 45.547 lux (coluna **AB**) e a razão foi 1,29 (coluna **AC**);

f) O céu escolhido foi o de número 7 (coluna **AD**) e o desvio foi de 0,129 ou 12,9 % (coluna **AE**).

Os resultados obtidos em uma amostra das planilhas produzidas mostraram que, na amostra, em **todas** as circunstâncias o procedimento escolheu o céu com menor desvio, como se pode ver nas linhas iniciais da planilha exemplificada na Figura 55. Devido ao grande número de planilhas e ao tamanho de cada uma não foram anexados no corpo do texto impresso as planilhas, sendo que foram anexadas no formato digital em um DVD, juntamente com as planilhas da primeira etapa da verificação. Encontra-se na pasta “**2 - SELEÇÃO TIPOS DE CÉU**”.

Com base nesta primeira análise foi realizada então uma verificação numérica relacionada aos valores horários obtidos na conversão luminosa e na posterior integração da luminosidade provocada pelo tipo de céu escolhido, através da Média e do Desvio Padrão, como se descreve a seguir.

Primeiramente se comparou os resultados da conversão feita em Florianópolis utilizando o arquivo do LABEEE, determinando-se a Divergência através da razão entre o valor de iluminância difusa determinado pelo tipo de céu escolhido e aquela obtida pela conversão luminosa em cada horário entre 8h e 16h. Este intervalo foi escolhido para eliminar as radiações de horários iniciais e finais do dia, ao longo do ano, que podem acusar Divergências elevadas sobre valores muito pequenos. O processamento foi feito com o globo de Baixa Resolução e com o globo de Alta Resolução, determinando-se a Divergência hora a hora e calculando-se a Média e o Desvio Padrão das Divergências horárias em cada resolução. Depois foi determinada a diferença entre a Divergência de cada hora em cada resolução. Deste novo conjunto foram então determinados a Média e o Desvio Padrão da diferença entre Divergências.

Na Baixa Resolução verificou-se uma Divergência Média equivalente a 1,10911 (cerca de 10,9%) e um Desvio Padrão equivalente a 0,2636 (cerca de 26,3%).

Na Alta Resolução verificou-se uma Divergência Média equivalente a 1,109061 (cerca de 10,9%) e um Desvio Padrão equivalente a 0,2637 (cerca de 26,3%).

Considerando-se a diferença entre as divergências horárias nas duas resoluções, verificou-se uma Diferença Média de 0,00005, com um Desvio Padrão de 0,011908 (menos de 1,2%).

Os valores obtidos permitiram fazer a análise do conjunto de arquivos de teste utilizando somente a Baixa Resolução, sem prejuízo da precisão.

A partir disto foram processados os arquivos climáticos LABEEE de um conjunto de cidades, sendo que em alguns casos, particularmente nos desvios de maior magnitude, foram também processados os arquivos climáticos EnergyPlus. No caso particular de Florianópolis, foram processados, além do LABEEE, dois arquivos do EnergyPlus disponibilizados no site, um no formato TRY de 1963 e outro no formato SWERA de 2000.

Foram selecionados, num total de 20 verificações em 14 cidades, os seguintes casos: Florianópolis-SC (LABEEE, E+ TRY e E+ SWERA), Belém-Pa, Belo Horizonte-MG, Brasília-DF, Campo Grande-MS, Cuiabá-MT, Curitiba-Pr (LABEEE e E+), Fortaleza-Ce, Manaus-Am (LABEEE e E+), Porto Alegre-RS (LABEEE e E+), Porto Velho-Rd, Recife-Pe, Rio de Janeiro-RJ e Salvador-Ba (LABEEE e E+).

Para cada uma das localidades, com cada arquivo, foram determinadas as Divergências horárias também através da razão entre o valor de iluminância difusa determinado pelo tipo de céu escolhido e aquela obtida pela conversão luminosa em cada horário entre 8h e 16h. Neste intervalo foram encontrados totais de horas entre 3.279 e 3.285 horas (diferenças causadas por alguma linha recusada em algum arquivo por inconsistência frente ao algoritmo). A partir destes dados foram então determinadas, para cada arquivo, a Média, o Desvio Padrão, Valores de Mínimo e de Máximo. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 20:

Os resultados demonstram que os valores das Divergências Médias obtidos encontram-se dentro do intervalo entre 1,03% e 32,33%. O valor da Divergência Média Geral com valor de 12,13%.

Já quando se considera o Desvio Padrão, observamos que os valores situam-se entre 17,83% e 196,46%. Os valores extremamente elevados encontrados no desvio padrão de Porto Alegre – LABEEE contrastam com valores relativamente bem mais baixos do arquivo correspondente do Energy+, que ficou em 52,33%, ainda assim bastante elevado. Considerando-se o Desvio Padrão Médio Geral, obtido pela média dos desvios padrões de cada arquivo processado, chega-se ao valor de **43,46%**.

Tabela 20: Valores de Média, Desvio Padrão, Valores de Mínimo e de Máximo obtidos para a Divergência horária entre iluminâncias difusas do tipo de céu e da conversão luminosa, em diferentes localidades brasileiras.

Local	FPOLIS	FPOLIS E+	FPOLIS E+SW	BELEM	B.H.
Mínimo	0,4787	0,4339	0,4638	0,8187	0,3230
Máximo	4,6370	5,5713	7,7101	2,6589	3,1683
Média	1,0586	1,2200	1,2235	1,0588	1,1098
Desv.Pad.	0,2986	0,6009	0,6022	0,2232	0,4122
Local	BRASILIA	CAMPO GD	CUIABÁ	CURITIBA	CURITIBA E+
Mínimo	0,6135	0,4819	0,4584	0,5447	0,3294
Máximo	3,2915	2,9200	3,1923	4,0454	7,8818
Média	1,1621	1,1143	1,0559	1,1623	1,2005
Desv.Pad.	0,3086	0,3212	0,2759	0,3663	0,6389
Local	FORTALEZA	MANAUS	MANAUS E+	PORTO AL.	PORTO AL. E+
Mínimo	0,5405	0,7877	0,5149	0,6894	0,5007
Máximo	2,3372	2,6529	3,0857	62,4950	5,8136
Média	1,0366	1,0960	1,0103	1,3233	1,2201
Desv.Pad.	0,1783	0,2664	0,2498	1,9646	0,5498
Local	PORTO VE.	RECIFE	R. JANEIRO	SALVADOR	SALVADOR E+
Mínimo	0,7235	0,4124	0,2363	0,6226	0,3944
Máximo	2,9646	2,5961	3,7954	2,5345	2,9105
Média	1,0644	1,1028	1,0883	1,0727	1,0463
Desv.Pad.	0,2228	0,3432	0,3763	0,2309	0,2627

Fonte: Autoria Própria.

Os valores acima referem-se ao conjunto de 20 arquivos processados, incluindo a repetição de cidades.

Numa segunda análise considerou-se, do conjunto acima, apenas um arquivo para cada cidade, utilizando o arquivo de menor desvio quando repetida a cidade. Assim, analisando-se o conjunto resultante de 14 cidades chegamos a uma Divergência Média Geral equivalente a 9,41%, enquanto que o Desvio Padrão Médio Geral foi de 31,12%.

Considerando-se especificamente o maior valor de máximo encontrado (maior igual a 62,495 em Porto Alegre – LABEEE indicaram a necessidade de uma análise mais aprofundada dos resultados.

Para uma melhor precisão da análise foram então estabelecidos intervalos de Divergência e verificadas as frequências de ocorrência das Divergências horárias dentro de cada intervalo para o conjunto dos 20 arquivos processados.

Os intervalos foram estabelecidos com os seguintes valores:

- Valor menor ou igual a 0,50 (até -50%);
- Valores maiores que 0,50 e menores ou igual a 0,75 (até -25%);
- Valores maiores que 0,75 e menores ou igual a 0,95 (até -5%);
- Valores maiores que 0,95 e menores ou igual a 1,00 (até 0%);
- Valores maiores que 1,00 e menores ou igual a 1,05 (até 5%);
- Valores maiores que 1,05 e menores ou igual a 1,25 (até 25%);
- Valores maiores que 1,25 e menores ou igual a 1,50 (até 50%);
- Valores maiores que 1,50 e menores ou igual a 5,00 (até 500%);

i) Valores maiores que 5,00 e menores ou igual a 10,00 (até 1.000%);

j) Valores maiores que 10,00 (acima de 1.000%);

Os valores obtidos estão mostrados na Tabela 21:

Tabela 21: Frequência de ocorrência das Divergências horárias segundo intervalos específicos para cada cidade / arquivo processado, indicada em percentual do Total de horas em cada processamento.

INTERV.	LOCAL						
	FLN	FLN E+	FLN E+SW	BELEM	B.H.	BRASI.	CPO. GD
TOTAL	3.279	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285
até 0,5	0,34	0,09	0,03	0,00	3,32	0,00	0,15
até 0,75	7,17	4,23	3,87	0,00	7,40	0,21	3,96
até 0,95	6,22	7,49	15,59	3,14	14,28	5,78	11,29
até 1,00	25,68	32,79	19,67	43,44	21,16	22,71	22,77
até 1,05	37,91	22,28	16,99	34,76	17,08	28,31	23,35
até 1,25	11,10	9,41	18,51	12,24	17,50	20,91	20,61
até 1,5	3,63	9,01	9,98	1,70	6,33	9,19	7,18
até 5,00	7,96	14,37	15,04	4,72	12,94	12,88	10,68
até 10,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
acima 10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	PTO. AL.	PTO. AL. E+	PTO. VLH.	RECIFE	R. JANEL.	SALVA.	SALVA. E+
TOTAL	3.283	3.285	3.283	3.285	3.285	3.285	3.285
até 0,5	0,00	0,00	0,00	1,40	2,28	0,00	0,79
até 0,75	0,03	3,99	0,03	8,10	5,54	1,92	5,57
até 0,95	5,06	10,96	3,56	13,94	11,66	12,36	14,79
até 1,00	20,29	25,30	39,17	19,57	22,89	27,67	33,33
até 1,05	38,29	18,66	35,88	15,77	29,13	22,53	15,53
até 1,25	17,67	14,82	14,26	22,16	12,94	24,11	17,63
até 1,5	4,78	10,14	2,19	6,24	4,72	4,93	7,25
até 5,00	12,55	15,89	4,90	12,82	10,84	6,48	5,11
até 10,00	0,85	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
acima 10,00	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	CUIABÁ	CURIT.	CURIT. E+	FORTAL.	MANAUS	MAN. E+	
TOTAL	3.283	3.285	3.285	3.283	3.280	3.285	
até 0,5	0,85	0,00	1,10	0,00	0,00	0,00	
até 0,75	4,02	0,03	6,94	1,31	0,00	10,35	
até 0,95	15,57	3,32	7,18	12,06	5,58	17,35	
até 1,00	26,10	26,67	30,62	35,09	33,14	31,29	
até 1,05	20,83	36,26	21,22	27,14	32,84	18,75	
até 1,25	21,38	16,07	12,05	17,85	17,35	12,63	
até 1,5	4,96	4,26	5,97	3,20	3,72	4,32	
até 5,00	6,27	13,39	14,37	3,35	7,38	5,30	
até 10,00	0,00	0,00	0,55	0,00	0,00	0,00	
acima 10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Fonte: Autoria Própria.

Os valores demonstram que a grande maioria dos resultados situa-se na faixa até 5% de divergência, ficando o segundo maior grupo nas divergências até 25%. Fez-se ainda um refinamento dos intervalos considerando-se: a) Divergências horárias entre -5% e 5%; b) Divergências horárias entre -25% e 25%; c) Divergências horárias entre -50% e 50%.

Os resultados estão mostrados na Tabela 22:

Tabela 22: Frequência de ocorrência das Divergências horárias considerando-se valores até 5%, 25% e 50% para cada cidade / arquivo processado, indicada em percentual do Total de horas em cada processamento.

INTERV.	LOCAL						
	FLN	FLN E+	FLN E+SW	BELEM	B.H.	BRASI.	CPO. GD
de -5% a 5%	63,59	55,07	36,65	78,20	38,23	51,02	46,12
de -25% a 25%	80,91	71,96	70,75	93,58	70,02	77,72	78,02
de -50% a 50%	91,70	85,21	84,60	95,28	83,74	87,12	89,16
	PTO. AL.	PTO. AL. E+	PTO. VLH.	RECIFE	R. JANEL.	SALVA.	SALVA. E+
de -5% a 5%	58,57	43,96	75,05	35,34	52,02	50,20	48,86
de -25% a 25%	81,30	69,74	92,87	71,45	76,62	86,67	81,28
de -50% a 50%	86,11	83,87	95,10	85,78	86,88	93,52	94,09
	CUIABÁ	CURIT.	CURIT. E+	FORTAL	MANAUS	MAN. E+	
de -5% a 5%	46,94	62,92	51,84	62,23	65,98	50,05	
de -25% a 25%	83,89	82,31	71,08	92,14	88,90	80,03	
de -50% a 50%	92,87	86,61	83,99	96,65	92,62	94,70	

Fonte: Autoria Própria.

Constata-se que a maioria dos valores de Divergência situa-se no intervalo entre -5% e 5%, com uma Média Geral de 53,64% das ocorrências. Considerando-se o intervalo entre -25% e 25% os valores situam-se na maioria entre 70% e 80%, com uma Média Geral de 80,06% das ocorrências. Se o intervalo de divergências for ampliado entre -50% e 50%, teremos uma Média Geral de 89,48% das ocorrências.

Relembramos aqui que estas divergências são relativas, não indicando a grandeza dos valores absolutos que as geraram. Por exemplo, o valor de Divergência de 62,495, encontrado nas divergências horárias de Porto Alegre obtidas através do arquivo do LABEEE, foi calculado para o dia 10 de junho às 8h da manhã. Neste caso as Radiações Global e Difusa tinham ambas o valor de apenas 1 Wh/m² e valor de Iluminâncias Global e Difusa equivalentes a **Zero**. O programa, no entanto, modelou uma iluminância difusa convertida de 129,85 lux, integrando no tipo de céu o valor de 8.115,35 lux.

Para uma avaliação da quantidade total de iluminância difusa modelada ao longo de um ano, foi feita uma verificação, para um conjunto de cidades, da soma anual de iluminâncias difusas horizontais horárias calculadas pela conversão luminosa e determinadas a partir da integração da distribuição das luminâncias calculadas em função do tipo de céu escolhido, determinando-se a diferença percentual entre as dos tipos de céu e as das convertidas iniciais. Os resultados estão apresentados na Tabela 23:

Tabela 23: Soma anual das iluminâncias difusas horizontais horárias calculadas pelo Apolux na conversão luminosa e em função do tipo de céu adotado, com a diferença absoluta e percentual entre elas.

LOCAL	SOMA APOLUX	SOMA TIPOCEU	DIFERENÇA	PERCENT.
BELEM	112.342.196	119.361.573	7.019.377	6,25
B.H	94.967.637	107.644.805	12.677.168	13,35
BRASILIA	98.593.457	119.384.711	20.791.253	21,09
CAMPO GRANDE	96.923.936	111.651.401	14.727.465	15,19
CUIABÁ	104.583.605	113.800.629	9.217.025	8,81
CURITIBA	90.563.402	107.669.474	17.106.071	18,89
FPOLIS	87.874.108	93.475.231	5.601.123	6,37
FORTALEZA	106.427.261	112.595.595	6.168.334	5,80
MANAUS	105.413.036	117.496.343	12.083.307	11,46
PORTO VELHO	106.088.769	114.001.619	7.912.849	7,46
RECIFE	107.352.272	117.616.902	10.264.630	9,56
PORTO ALEGRE	79.888.095	89.266.324	9.378.229	11,74
RIO DE JANEIRO	87.418.990	98.515.476	11.096.486	12,69

Fonte: Autoria Própria.

Os valores das diferenças percentuais situaram-se entre 5,80% em Fortaleza e 21,09% em Brasília. A diferença percentual média entre os valores destas cidades verificadas foi de 11,44%.

Com estes dados, consideramos suficientes as verificações realizadas para este passo do procedimento.

5.3 VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DO ENCADEAMENTO DE CÁLCULO NA DETERMINAÇÃO DA EALN ATRAVÉS DO DLC

Com a finalidade de conferir a correção dos dados resultantes do procedimento de simulação dinâmica realizado pelo Apolux, foram construídas planilhas de comparação entre os dados gerados pela simulação dinâmica e os dados gerados pela simulação estática com os mesmos parâmetros. Nesta verificação foi utilizado, para as simulações dinâmicas o procedimento que utiliza o DLC clássico (o primeiro a ser desenvolvido), conforme descrito na Metodologia. O pressuposto desta verificação é que o procedimento dinâmico corresponde aos mesmos resultados que uma sucessão de procedimentos estáticos com parâmetros equivalentes, lembrando que os procedimentos estáticos já foram validados em trabalhos anteriores.

Partindo de um modelo de ambiente de 8m x 10 m com uma janela frontal ao Norte, (que será descrito na próxima etapa de verificação como TST0), realizou-se uma simulação dinâmica utilizando o procedimento relativo ao DLC e, para cada hora de cada dia do ano foi gerado um arquivo **TXT** contendo os parâmetros da simulação e os resultados de iluminância obtidos para os vértices do plano de análise, o que corresponderia a um dado de simulação estática. Desses arquivos, 28 foram selecionados para a comparação com os dados da simulação estática. A seleção contém dois arquivos de cada tipo de céu (2-15) distribuídos ao longo dos meses e horas do ano. Na simulação feita não houve nenhuma ocorrência de céu do tipo 1 (característico nublado escuro)

Utilizando o mesmo modelo de ambiente em simulações estáticas do Apolux, os parâmetros do cálculo de radiosidade (parâmetros temporais, tipo de céu, parâmetros do tipo de céu, luminância do Zenith e ciclos para radiosidade) foram ajustados para corresponder aproximadamente aos parâmetros de simulação de cada um dos 28 arquivos selecionados, procedendo-se então ao cálculo das simulações estáticas correspondentes aos 28 arquivos selecionados da simulação dinâmica, gerando outros 28 arquivos **TXT** com uma simulação estática correspondente a cada uma das dinâmicas.

Os arquivos foram transformados em planilhas para a comparação e cálculo de diferenças.

Na Figura 57 pode-se ver a janela de definição dos dados de simulação estática para o cálculo de uma abóbada, onde foram destacados com um retângulo vermelho os campos relacionados com a simulação dinâmica: dados da localidade, data e hora, tipo de céu, fator de Turvamento T_v ou de razão D_v/E_v e Luminância do Zenith.

Aqui chamamos a atenção para uma pequena diferença, na janela, entre os dados de Localidades Brasileiras constantes da base atualmente utilizada no programa Apolux (usado para extrair a imagem), que diverge um pouco da utilizada nas planilhas de comparação, inscritas no arquivo EPW. Quando foram executadas as verificações, entretanto, o programa ainda utilizava um modo de entrada dos dados da localidade que era manual, o que permitiu uma maior proximidade entre os valores de cálculo estático e dinâmico realizados na verificação. Esta figura foi colocada apenas a título de exemplo de entrada dos dados, já que estes valores específicos divergem um pouco dos da planilha.

Figura 57: Parâmetros de simulação estática para comparação com os de simulação dinâmica (assinalados com destaque em vermelho).

Fonte: Autoria Própria

No procedimento de cálculo foi necessário um pequeno ajuste na avaliação, considerando-se que os dados da simulação estática e da dinâmica têm precisão um pouco diferente. Os dados dos descritores gerados na simulação dinâmica, internos ao processamento, têm precisão de 16 casas decimais. Os dados de entrada da simulação estática que correspondem aos descritores, são entradas com precisões menores, geralmente de 2 ou 3 casas decimais. Isto dá uma pequena diferença na determinação da Luminância do Zenith, e conseqüentemente na distribuição de luminâncias.

Mas como a fórmula de definição das luminâncias é relacional ao Zenith, os valores distribuídos estão na mesma proporção configurada entre os descritores no modo dinâmico e no modo estático. Assim, os dados de iluminâncias nos vértices dos planos de análise apresentam a mesma proporção. Por este motivo a comparação é feita considerando as razões encontradas entre os valores do modo dinâmico e do modo estático. Ou seja a razão obtida dividindo-se a Luminância do Zenith calculada com o procedimento dinâmico pela calculada no procedimento estático – subtraída do valor 1, obtendo-se então um desvio, que será dado percentualmente. Este mesmo desvio, ou um valor bastante próximo dele deve ser obtido na análise das iluminâncias de cada vértice obtidas pelos dois métodos.

Na Figura 58 temos um *fac-simile* da planilha gerada para uma situação específica, calculada para Florianópolis, no dia 19 de janeiro, às 11 horas, onde o programa selecionou, na simulação dinâmica, o céu de tipo 6, encoberto e sem Sol.

Figura 58: Fac-símile da tabela de comparação de dados entre simulação dinâmica e estática, em Florianópolis, no dia 19 de janeiro, às 11:00 h, com céu do tipo 6, (parcialmente encoberto sem Sol).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	step: 442	lat: -27.670	long: 48.550	tipo ceu: 6	mes: 1	dia: 19	hora: 11	
2	sol2.a: 1.296	sol2.h: 1.212						
3	lat2:	-27,67	long2:	48,55				
4								
5	sol.az:	1,296	1,296	1				
6	sol.h:	1,212	1,212	1				
7	pos:	299	299					
8	nasc:	5,246	5,246	1				
9	poen:	18,754	18,754	1	Desvio %			
10	LumZenit	23,818346	23,97	0,993673175	-0,633			
11	Turv	22,507599	20	1,12537995				
12	Razão DE	0,407398	0,41	0,993653659				
13	lluCeU	54568,638	54917	0,993656573				
14	lluSol	0	0		DLC	Estática	Razão	Desvio
15	Vt:49	x: 0.000000	y: 0.000000	z: 1.000000	188,679	189,884	0,993654	-0,635
16	Vt:50	x: 0.400000	y: 0.000000	z: 1.000000	172,047	173,146	0,993653	-0,635
17	Vt:51	x: 0.400000	y: 0.500000	z: 1.000000	134,643	135,503	0,993653	-0,635
18	Vt:52	x: 0.800000	y: 0.000000	z: 1.000000	172,826	173,930	0,993653	-0,635
19	Vt:53	x: 0.800000	y: 0.500000	z: 1.000000	134,667	135,527	0,993654	-0,635
20	Vt:54	x: 0.800000	y: 1.000000	z: 1.000000	130,210	131,042	0,993651	-0,635
21	Vt:55	x: 1.200000	y: 0.000000	z: 1.000000	174,543	175,658	0,993652	-0,635
22	Vt:56	x: 1.200000	y: 0.500000	z: 1.000000	141,363	142,266	0,993653	-0,635
23	Vt:57	x: 1.200000	y: 1.000000	z: 1.000000	133,641	134,495	0,993650	-0,635
24	Vt:58	x: 1.200000	y: 1.500000	z: 1.000000	134,670	135,530	0,993655	-0,635
25	Vt:59	x: 1.600000	y: 0.000000	z: 1.000000	184,572	185,751	0,993653	-0,635
26	Vt:60	x: 1.600000	y: 0.500000	z: 1.000000	144,284	145,206	0,993650	-0,635
27	Vt:61	x: 1.600000	y: 1.000000	z: 1.000000	135,803	136,670	0,993656	-0,634
28	Vt:62	x: 1.600000	y: 1.500000	z: 1.000000	139,060	139,948	0,993655	-0,635
29	Vt:63	x: 1.600000	y: 2.000000	z: 1.000000	146,802	147,740	0,993651	-0,635
30	Vt:64	x: 2.000000	y: 0.000000	z: 1.000000	190,467	191,683	0,993656	-0,634

Fonte: Autoria própria

O fator de análise da divergência foi considerado como sendo a razão entre as Luminâncias do Zenith no modo Dinâmico (célula **B10**) e a estática (célula **C10**) e está expresso na célula **D10**.

Nas colunas **E** e **F**, a partir das células **E15** e **F15** estão os valores de iluminâncias dos vértices obtidos no modo dinâmico e estático. Nas colunas a partir de **G15** e **H15** temos o valor da razão e a expressão do desvio (o quanto de distancia de 100%). Observa-se que os desvios são praticamente iguais em todos os casos, de cerca de 0,63%, praticamente iguais ao estabelecido na razão entre as Luminâncias do Zenit (célula **E10**).

Este padrão de resultados foi encontrado em todas as 28 planilhas construídas, demonstrando a paridade de resultados de cálculo da simulação estática com a dinâmica.

Os resultados não deixaram dúvidas quanto à consistência e correção do procedimento de determinação da Estimativa Anual de Luz Natural - **EALN** através da utilização do conjunto de Daylight Coefficients – **DLCs**.

Desta forma, consideramos o procedimento validado, sendo que na etapa seguinte da verificação ele será utilizado como o método de referência, cujos resultados serão considerados para avaliar a correção dos outros dois métodos.

O conjunto de Planilhas relativas a esta verificação estão no DVD anexo na Pasta “**3 – VERIFICAÇÃO DINÂMICA X ESTÁTICA**”.

5.4 VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA DE RESULTADOS DE CÁLCULOS DA EALN ATRAVÉS DOS TRÊS DIFERENTES CONCEITOS

Esta última etapa da verificação destina-se a comparar os resultados e o desempenho em tempo de processamento dos 3 métodos propostos.

O conceito da verificação, basicamente, consiste em processar modelos de complexidade variada segundo graus crescentes de resolução do Globo de Vetores utilizado na determinação da visibilidade de cada modelo. Cada modelo com cada visibilidade é processado para determinação da EALN utilizando-se em todos os casos o mesmo arquivo EPW com o mesmo intervalo diário de processamento.

Descreveremos a seguir as características dos modelos processados, das resoluções visibilidade escolhidas e dos dados de métrica dinâmica utilizados para a comparação dos valores resultantes de cada procedimento de cálculo dentro das métricas adotadas.

As planilhas resultantes deste procedimento de verificação encontram-se no DVD anexo na Pasta “4 – VERIFICAÇÃO EALN”.

5.4.1 Descrição dos Modelos Usados na Verificação

Para a verificação foram construídos 4 modelos considerando-se uma complexidade crescente, com um conseqüente aumento no número de vértices protagonistas e de análise de um modelo para o seguinte. Resumidamente os modelos seguem a seguinte descrição:

- a) Ambiente retangular com janela desobstruída;
- b) Ambiente retangular com janela contendo protetores de sombreamento
- c) Ambiente em L com janela contendo protetores de sombreamento e iluminação zenital.
- d) Edifício com múltiplos ambientes e elementos exteriores protagonistas, como painéis de sombreamento, marquises e pisos externos, considerado de alta complexidade.

Apresenta-se a seguir a descrição das características de cada modelo.

5.4.1.1 Ambiente Retangular Sem Protetores - Modelo TST0_0-1

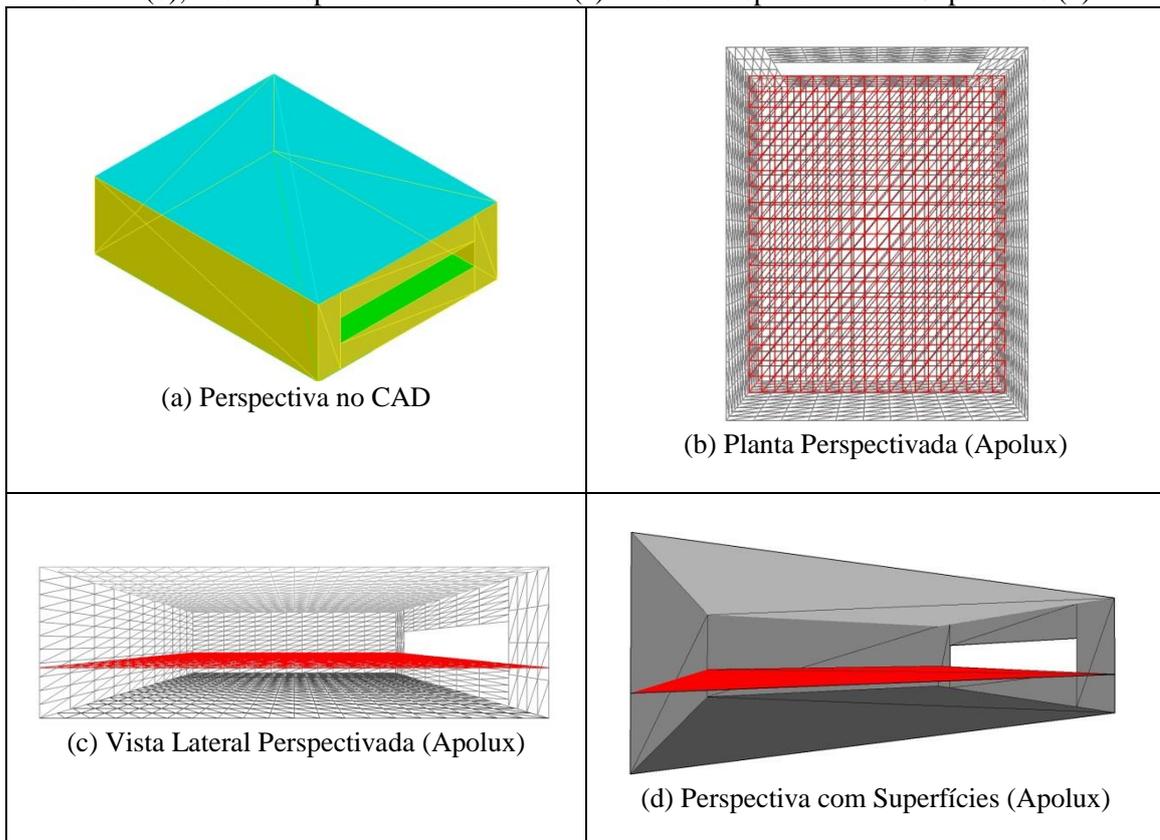
Dimensões: 8 m x 10 m, com altura de 3 m e janela frontal desobstruída de 6 m x 1 m, centrada na parede, com peitoril de 1 m. O plano de análise foi colocado a 1 m. Esta opção foi feita para criar um ajuste do plano de análise à altura da janela e facilitar a análise dos resultados em pontos que se alinham com a janela e a parede. Não corresponde a um plano de trabalho normalizado a 0,75 m, sendo apenas um plano destinado à verificação dos resultados sem qualquer ligação com Normas.

Orientação: O modelo foi simulado considerando a janela frontal voltada para o Norte.

Materiais: foram consideradas refletâncias padrões recomendadas de Piso = 30%, Parede = 50% e Teto = 70%. Não foi colocado vidro na abertura para facilitar o tratamento dos dados, já que o vidro envolveria a transmitância direcional variada, o que poderia introduzir um elemento de divergência nos diferentes modelos já que as condições de exposição em cada um seriam modificadas. Desta forma optou-se por processar as aberturas sem vidros, para que os resultados pudessem ser verificados com mais consistência.

Resolução: a resolução de divisão do ambiente foi adotada uniforme, equivalente a uma parcela (triângulo) com área máxima de 0,1 m². Resultaram no total de 2.134 vértices, sendo 1.672 de planos opacos difusos e 462 vértices do plano de análise. Não há no modelo planos transmissores difusos. As imagens do Modelo TST0_0-1, inclusive o fracionamento, estão mostradas na Figura 59:

Figura 59: Imagens do Modelo TST0_0-1 com desenho em CAD (a), Planta Perspectivada Fracionada (b), Vista Perspectivada Fracionada (c) e Vista Perspectivada em Superfícies (d).



Fonte: Autoria própria.

5.4.1.2 Ambiente Retangular Com Protetores - Modelo TST1_0-1

Dimensões: Ambiente retangular com 8 m x 10 m, com altura de 3 m e janela frontal de 6 m x 1 m, centrada na parede, com peitoril de 1 m. O plano de análise também foi colocado a 1 m.

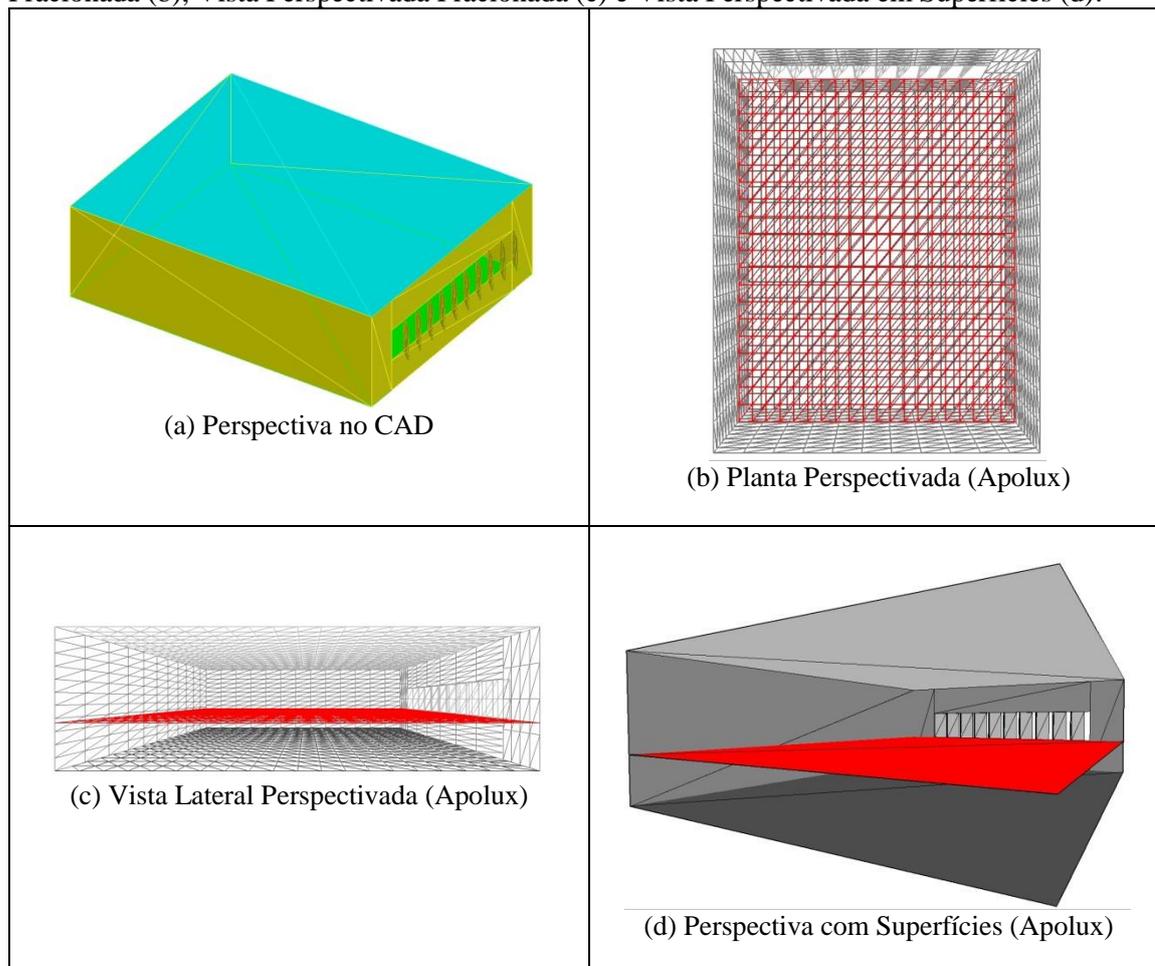
Protetores: Foram colocados protetores na janela, formado por placas verticais de 0,5 m de largura e 1 m de altura, inclinadas 45 graus na direção Nordeste, e espaçados 0,6 m entre eles. A opção de placas verticais inclinadas deu-se para criar um elemento de diferenciação na penetração solar que pudesse ser captada na distribuição dos resultados no plano de análise. Houve intenção de não sombrear totalmente a abertura, para permitir a penetração de Sol diretamente no ambiente em alguns horários. O formato e inclinação dos protetores foram escolhidos aleatoriamente.

Orientação: O modelo foi simulado também considerando a janela frontal voltada para o Norte, como no Modelo TST0.

Materiais: Foram consideradas refletâncias padrões recomendadas de Piso = 30%, Parede = 50%, Teto = 70% e Protetor = 70%. Não foi colocado vidro na abertura para facilitar o tratamento dos dados, conforme explicado no modelo anterior.

Resolução: a resolução de divisão do ambiente foi adotada uniforme, equivalente a uma parcela (triângulo) com área máxima de 0,1 m². Resultaram no total de 2.494 vértices, sendo 2.032 de planos opacos difusos e 462 vértices do plano de análise. Não há no modelo planos transmissores difusos. As imagens do Modelo TST1_0-1, inclusive o fracionamento, estão mostradas na Figura 60:

Figura 60: Imagens do Modelo TST1_0-1 com desenho em CAD (a), Planta Perspectivada Fracionada (b), Vista Perspectivada Fracionada (c) e Vista Perspectivada em Superfícies (d).



Fonte: Autoria própria.

5.4.1.3 Ambiente em L Com Protetores e Iluminação Zenital - Modelo TST2_0-1

Dimensões: Ambiente em L correspondendo ao mesmo ambiente do Modelo TST1 ampliado, com 8 m x 10 m na parte maior e um acréscimo de 8 m x 5 m colocado à direita, alinhado ao fundo do ambiente maior; altura de 3 m e janela frontal de 6 m x 1 m, centrada na parede, com peitoril de 1 m. Foi acrescentada a este modelo uma abertura zenital, de 4m x 12 m longitudinal paralela à parede do fundo do modelo, centrada no ambiente contínuo, com um anteparo colocado abaixo dela. O plano de análise também foi colocado a 1 m.

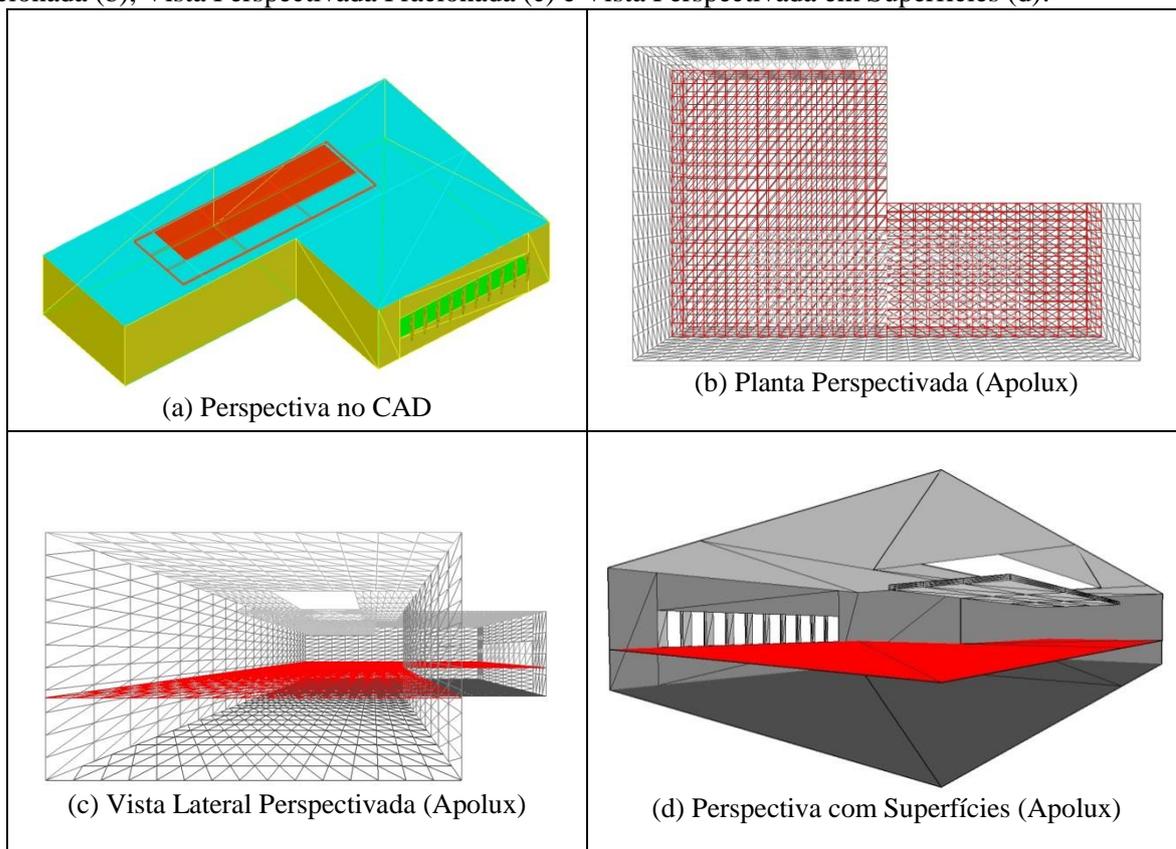
Protetores: Foram colocados protetores na janela frontal como no Modelo TST1, formado por placas verticais de 0,5 m de largura e 1 m de altura, inclinadas 45 graus na direção Nordeste, e espaçados 0,6 m entre eles. Além destes, foi colocada uma placa opaca refletora de 6 m x 14 m, centrada com a abertura zenital e colocada a uma altura de 2,5 m do piso (face superior).

Orientação: O modelo foi simulado também considerando a janela frontal voltada para o Norte.

Materiais: Foram consideradas refletâncias padrões recomendadas de Piso = 30%, Parede = 50%, Teto = 70%, Protetor = 70% e Placa = 75%. Não foi colocado vidro na abertura para facilitar o tratamento dos dados.

Resolução: a resolução de divisão do ambiente foi adotada uniforme, equivalente a uma parcela (triângulo) com área máxima de 0,1 m². Resultaram no total de 4.348 vértices, sendo 3.614 de planos opacos difusos e 734 vértices do plano de análise. Não há no modelo planos transmissores difusos. As imagens do Modelo TST2_0-1, inclusive o fracionamento, estão mostradas na Figura 61:

Figura 61: Imagens do Modelo TST2_0-1 com desenho em CAD (a), Planta Perspectivada Fracionada (b), Vista Perspectivada Fracionada (c) e Vista Perspectivada em Superfícies (d).



Fonte: Autoria própria.

5.4.1.4 Edifício Tribunal de Contas PR, com Múltiplos Ambientes e Elementos Exteriores – Modelo TC_1-0

O Modelo TC_1-0 foi derivado da modelagem feita por Pinto (2014) para o edifício do Tribunal de Contas do Estado do Paraná (Figura 62), objeto de estudo de sua dissertação. O edifício é bastante complexo, contendo 3 andares subdivididos em várias salas, que foram simulados naquele trabalho dividindo-se no interior cada andar em duas partes, constituindo 6 modelos de simulação, conforme descrito no tópico 3.3.5.

Figura 62: Tribunal de Contas do Paraná – Ed. Sede e Anexo.

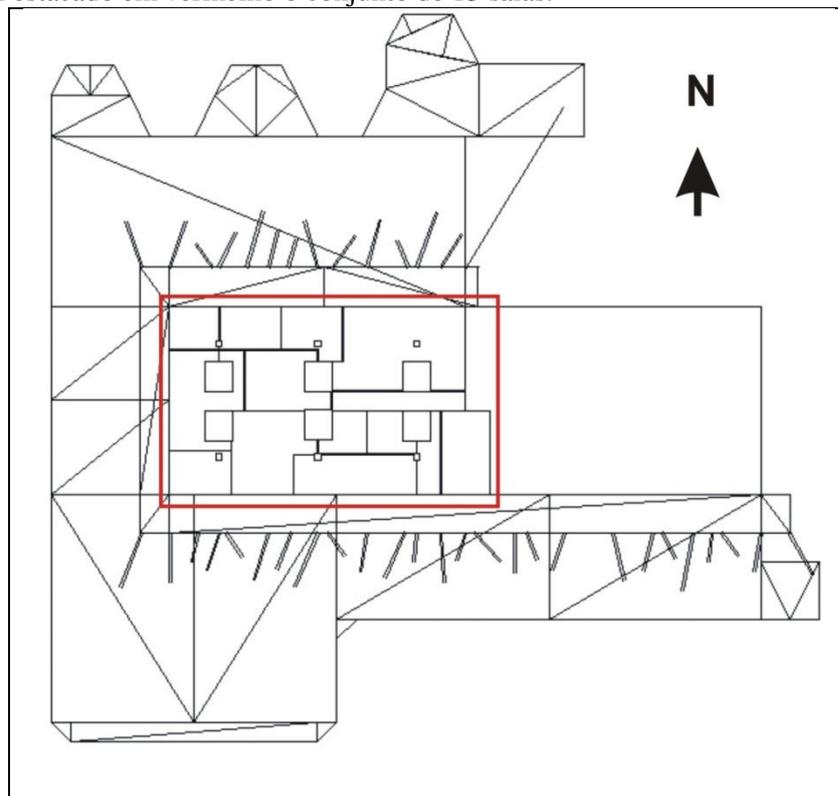


Fonte: Apud Pinto (2014).

A partir de um dos 6 modelos desenvolvidos por Pinto (2014), tomamos como modelo de ambiente complexo nesta verificação o conjunto de salas de um dos andares, o intermediário, sendo selecionada a parte frontal do modelo, com 13 salas, e eliminados os componentes que não estariam diretamente ligados com o espaço escolhido, preservando praticamente todo o conjunto de protetores por sua influência nas janelas laterais, assim como parte das superfícies do piso externo modelado no original. No modelo original este piso representa o espelho d'água que envolve o edifício. Pelas mesmas razões teóricas utilizadas por Pinto (2014), consideramos para efeito de simulação como sendo um piso opaco difuso.

A planta simplificada do modelo é mostrada na Figura 63, destacando-se no retângulo vermelho o conjunto de 13 salas simulado:

Figura 63: Planta simplificada do modelo gerado a partir de Pinto (2014). Destacado em vermelho o conjunto de 13 salas.



Fonte: Autoria própria a partir de Pinto (2014)

Foram atribuídas a este modelo as seguintes características:

Dimensões: Conjunto de Salas com aproximadamente 19 m x 30 m, altura interna de 2,8 m. O Plano de análise foi colocado a 0,75 m do piso. A extensão total do modelo tem dimensões aproximadas de 75 m x 80 m considerando o piso externo.

Protetores: Foram mantidos praticamente todos os protetores externos do modelo original.

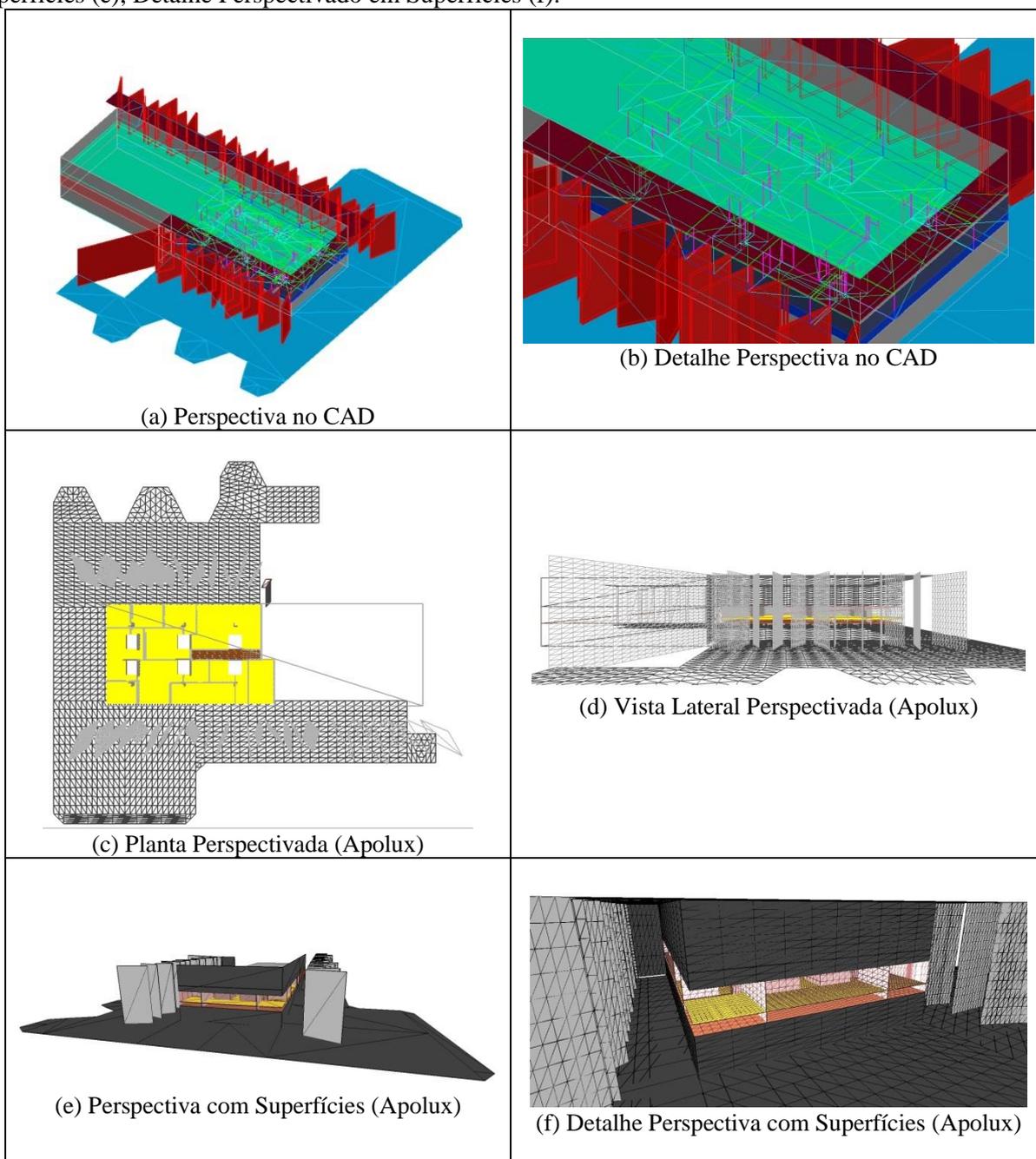
Orientação: O modelo foi simulado com a orientação conforme a Figura 62, e não na orientação original, buscando-se criar uma condição de diferenciação mais controlável entre as duas faces para facilitar a análise dos resultados.

Materiais: Foram consideradas as refletâncias especificadas no trabalho de Pinto (2014), envolvendo 14 materiais distintos, inclusive o vidro, que não detalharemos aqui por ser muito extenso.

Resolução: a resolução de divisão do ambiente foi adotada escalonadamente: a parcela (triângulo) de referência foi definida com área máxima de 1,00 m²; os planos de análise foram fracionados 20 vezes mais (máximo de 0,05 m²); pisos, paredes e divisórias foram fracionados 5 vezes mais (máximo de 0,20 m²), os demais planos foram fracionados de acordo com o fator geral de 1,00 m², exceto os vidros, cujos planos não foram fracionados, já que eles participam do

processo apenas com atenuadores de transmitância, como já descrito. Resultaram no total de 30.094 vértices, sendo 22.918 de planos opacos difusos, 138 de transmissores especulares (vidros) e 7.038 vértices do plano de análise. Não há no modelo planos transmissores difusos. As imagens do Modelo TC, inclusive o fracionamento, estão mostradas na Figura 64:

Figura 64: Imagens do Modelo TC_1-0 com desenho em CAD (a), Vista Perspectivada no CAD (b), Planta Perspectivada Fracionada (c), Vista Perspectivada Fracionada (d), Vista Perspectivada em Superfícies (e), Detalhe Perspectivado em Superfícies (f).



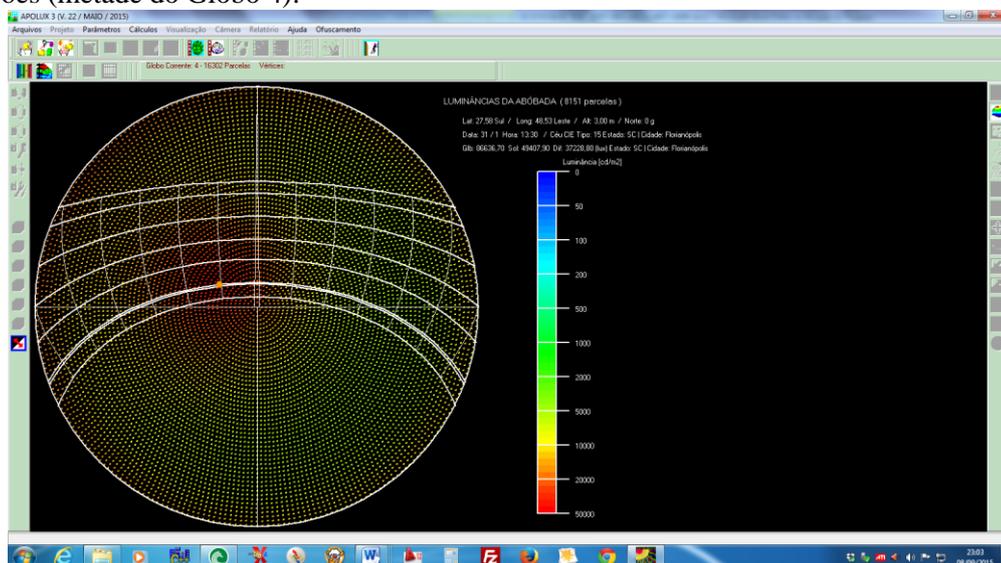
Fonte: Autoria própria a partir de Pinto (2014).

5.4.2 Determinação das Resoluções de Visibilidade

A Visibilidade foi determinada selecionando-se 3 resoluções de globo que consideramos, para os padrões do MVE, de Baixa Resolução, Média Resolução e Alta Resolução, conforme descrito no tópico 4.2 da Metodologia:

Para a **Baixa Resolução** foi selecionado o Globo 4 de 16.302 direções, correspondendo à abóbada a metade disto, ou seja, 8.151 direções, conforme ilustrado na Figura 65, numa imagem de abóbada gerada no Apolux com a resolução especificada. Cada ponto da imagem representa um ângulo sólido que pode ser estimado pelos limites médios entre cada 4 pontos. Cada vetor representado pelo ponto projetado embarca um ângulo sólido de aproximadamente $0,000771$ sterradiano (equivalente a $4 * \text{PI} / 16.302$).

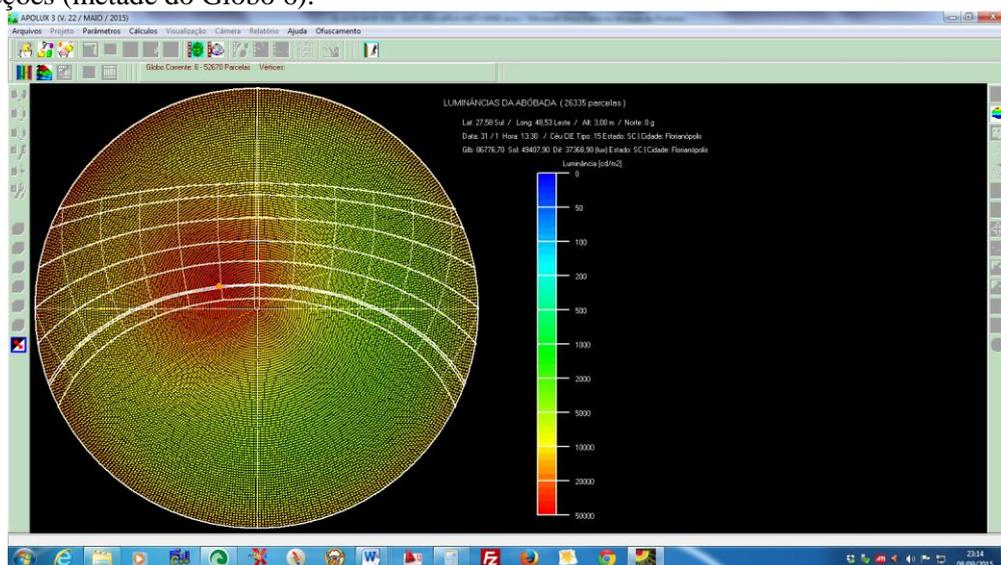
Figura 65: Imagem projetada de uma abóbada gerada para Florianópolis no Apolux com a resolução de 8.151 direções (metade do Globo 4).



Fonte: Autoria Própria (Apolux)

Para a **Média Resolução** foi selecionado o globo de 52.670 direções, correspondendo à abóbada a metade disto, ou seja, 26.335 direções, conforme ilustrado na Figura 66, numa imagem de abóbada gerada no Apolux com a resolução especificada. Cada vetor representado pelo ponto projetado embarca um ângulo sólido de aproximadamente $0,000239$ sterradiano.

Figura 66: Imagem projetada de uma abóbada gerada para Florianópolis no Apolux com a resolução de 26.335 direções (metade do Globo 6).

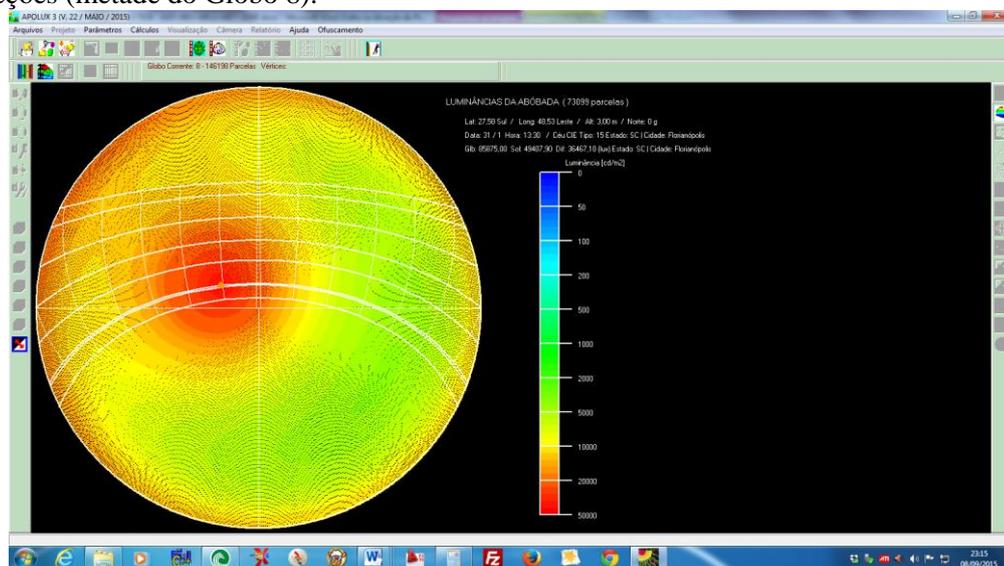


Fonte: Autoria Própria (Apolux)

Para a **Alta Resolução** foi selecionado o globo de 146.198 direções, correspondendo à abóbada a metade disto, ou seja, 73.099 direções, conforme ilustrado na Figura 67, numa imagem

de abóbada gerada no Apolux com a resolução especificada. Cada vetor representado pelo ponto projetado embarca um ângulo sólido de aproximadamente 0,000086 steradiano.

Figura 67: Imagem projetada de uma abóbada gerada para Florianópolis no Apolux com a resolução de 73.099 direções (metade do Globo 8).



Fonte: Autoria Própria (Apolux)

A **Alta Resolução** é a maior atualmente disponível no programa APOLUX e seus resultados serão considerados os mais precisos, conforme Cunha (2011). Os resultados obtidos nas resoluções **Baixa** e **Média** serão comparados com estes para avaliar a precisão do cálculo, considerando-se o desvio como a diferença da razão entre cada um destes valores, Baixa e Média, e o da Alta subtraídos do valor 1.

A Visibilidade será calculada com as 3 resoluções para os 4 modelos. Para termos uma ideia do montante de análises de direções feitas na determinação da Visibilidade em cada resolução e em cada modelo, podemos estimar que para cada vértice de um modelo, **protagonista** ou de **análise** (no nosso caso os **protagonistas** são somente opacos difusos) o algoritmo analisa o equivalente à metade das direções do Globo da resolução corrente, correspondente a um hemisfério de acordo com a posição do plano no espaço. Desta forma, o plano de corte que define o hemisfério de análise no globo pode conter vetores que estejam exatamente no limite de corte, sendo então descartados, o que pode gerar um hemisfério com um número de vetores levemente inferior à metade das direções do globo.

No Quadro 2 estão representadas as estimativas de direções totais analisadas para cada um dos modelos utilizados na verificação em cada resolução de Visibilidade.

Quadro 2: Estimativa de direções analisadas em cada uma das 3 Resoluções definidas, para cada um dos 4 Modelos avaliados.

MODELO	VÉRTICES DE ANÁLISE	VÉRTICES TOTAIS	GLOBO 4 (8.151)	Globo 6 (26.335)	GLOBO 8 (73.099)
Modelo TST0_0-1	462	2.134	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: Autoria própria.

Pelos dados pode-se verificar que o **conjunto das direções totais analisadas** durante a verificação em todas as situações varia de um **mínimo de pouco mais de 17 milhões**, no modelo mais simples com a Baixa Resolução, até **pouco mais de 2,2 bilhões** no modelo mais complexo na Alta Resolução. É importante lembrar que no procedimento de determinação da visibilidade todas as direções são analisadas, estando contida num conjunto de direções que expressam um Fator de Forma ou descrita numa direção do **céu / solo / PUs**, conforme conceituado este conjunto.

5.4.3 Verificação da Determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN – nos Diferentes Métodos

Para cada um dos modelos e para cada uma das resoluções de visibilidade, os procedimentos de cálculo para comparação dos resultados e verificação da coerência entre eles seguiram os seguintes passos:

- a) Determinação da Visibilidade.
- b) Determinação dos DLCs no modo clássico.
- c) Determinação dos Coeficientes de Radiosidade.
- d) Determinação dos Steps de características do céu.
- e) Determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN - através do DLC.
- f) Determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN - através dos Coeficientes de Radiosidade.
- g) Determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN - através da Radiosidade Plena.

Determinação da Visibilidade.

A determinação da visibilidade foi feita para cada um dos 4 Modelos segundo cada uma das 3 Resoluções determinadas, conforme descrito acima. Foram produzidos, para cada modelo 3 arquivos de Visibilidade: Baixa, Média e Alta Resolução, gerando 12 combinações.

Determinação dos DLCs no Modo Clássico

Os DLCs no modo clássico foram calculados para cada um dos 4 Modelos em cada uma das 3 Resoluções também. Estes cálculos utilizam o arquivo de Visibilidade com a resolução correspondente, ou seja, para cada um dos modelos, os arquivos de DLCs são associados a cada uma das resoluções, sendo calculados nos modos de Baixa, Média e Alta Resolução, gerando 12 combinações. O número de ciclos de radiosidade especificados para a determinação do DLC foi de 10 Ciclos.

Determinação dos Coeficientes de Radiosidade

Os Coeficientes de Radiosidade CRs também foram calculados para cada um dos 4 Modelos em cada uma das 3 Resoluções. Da mesma forma que os DLCs, estes cálculos utilizam o arquivo de Visibilidade com a resolução correspondente, ou seja, para cada um dos modelos, os arquivos de Coeficientes de Radiosidade também são associados a cada uma das resoluções, sendo calculados nos modos de Baixa, Média e Alta Resolução, gerando 12 combinações. O número de ciclos de radiosidade especificados para a determinação do CR também foi de 10 Ciclos.

Determinação dos Steps com Tipos e Características do Céu

Os arquivos de *steps* gerados no Apolux correspondem à descrição dos parâmetros que serão usados para determinar a distribuição de luminâncias do tipo especificado de céu. Os arquivos de *steps* não têm nenhuma relação com os Modelos, e sim com a localização geográfica destes. Para este estudo utilizamos na construção do arquivo de *steps* (que é um arquivo virtual interno ao Apolux) o arquivo climático EPW de Florianópolis - SC, obtido no site do LABEEE (2014). O

arquivo climático está descrito em linhas correspondentes a intervalos horários de 1 hora, num total de 8.760 horas. Para as simulações realizadas nas verificações foi considerado um período diário compreendido entre 8 h e 18 h, o que significam em média 11 horas diárias, num total teórico de aproximadamente 4.015 horas ao longo do ano. Nas simulações verificou-se, entretanto, provavelmente em função de horários com o Sol muito próximo do horizonte ou mesmo em função de algum dado inconsistente descartado, verificou-se que foram processadas pouco mais de 3.480 horas. Para efeito deste estudo não consideramos relevante detalhar este aspecto, dadas as verificações anteriores realizadas e já comentadas neste capítulo

O cálculo dos *steps* também está, atualmente, associado com o grau de resolução da visibilidade, pois o tipo de céu é determinado a partir de testes de configurações da abóbada que seguem, na integração das distribuições de teste, a quantidade de direções do céu correspondentes ao globo utilizado no cálculo da visibilidade. Como os *steps* para uma dada resolução do Globo são os mesmos, independente do modo de cálculo da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN, foram produzidos apenas 3 arquivos de *steps* calculados: para Baixa, Média e Alta Resolução de visibilidade. Cada um destes arquivos foi utilizado na simulação dos 4 Modelos segundo os 3 Métodos em cada uma das resoluções do Globo.

Determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN - Através do DLC

A determinação da EALN através do método do DLC associa, para cada um dos 4 Modelos e em cada uma das 3 Resoluções, o arquivo de DLC e o arquivo de *steps* correspondentes, através do procedimento de cálculo específico para este tipo de coeficiente, o DLC. Deste procedimento resultam então, 12 simulações encadeadas, gerando então 12 planilhas de resultados para este método de cálculo da EALN.

Determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN - Através dos Coeficientes de Radiosidade.

A determinação da EALN através do método dos Coeficientes de Radiosidade também associa, para cada um dos 4 Modelos e em cada uma das 3 Resoluções, o arquivo de Coeficientes de Radiosidade e o arquivo de *steps* correspondentes, através do procedimento de cálculo específico para este tipo de coeficiente. Deste procedimento resultam então, outras 12 simulações encadeadas, gerando então 12 planilhas de resultados para este método de cálculo da EALN.

Determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN - Através da Radiosidade Plena

Diferentemente dos outros dois métodos, a determinação da EALN através do método da Radiosidade Plena não utiliza arquivos de coeficientes (DLC ou Radiosidade) associando, para cada um dos 4 Modelos e em cada uma das 3 Resoluções, os arquivos de Visibilidade diretamente com os arquivos de *steps* correspondentes, através do procedimento de cálculo específico para este método. Deste procedimento resulta então, um terceiro conjunto de 12 simulações encadeadas, gerando 12 planilhas de resultados para este método de cálculo da EALN. No caso da Radiosidade Plena, os ciclos de radiosidade não foram ainda aplicados, já que não há determinação de coeficientes. No caso eles são aplicados diretamente na etapa de determinação da EALN utilizando os arquivos de visibilidade. Da mesma forma que nos dois métodos que utilizaram coeficientes, aqui também o número de ciclos de radiosidade especificados foi de 10 Ciclos.

As diferentes combinações entre Modelo, Resolução e Método da Determinação da EALN resultaram na realização de um total de 36 simulações, conforme resumidas no Quadro 3.

Quadro 3: Resumo das Simulações de Verificação descrito considerando 4 Modelos, 3 Resoluções de Visibilidade e 3 Métodos de Determinação da EALN.

Modelo	Visibilidade	Coefficientes	Arquivo steps	Resultado EALN
TST0_0-1	BAIXA	DLC	STEP BAIXA	EALN DLC BAIXA
		COEF. RAD	STEP BAIXA	EALN CR BAIXA
		RAD. PLENA	STEP BAIXA	EALN PLENA BAIXA
	MÉDIA	DLC	STEP MÉDIA	EALN DLC MÉDIA
		COEF. RAD	STEP MÉDIA	EALN CR MÉDIA
		RAD. PLENA	STEP MÉDIA	EALN PLENA MÉDIA
	ALTA	DLC	STEP ALTA	EALN DLC ALTA
		COEF. RAD	STEP ALTA	EALN CR ALTA
		RAD. PLENA	STEP ALTA	EALN PLENA ALTA
TST1_0-1	BAIXA	DLC	STEP BAIXA	EALN DLC BAIXA
		COEF. RAD	STEP BAIXA	EALN CR BAIXA
		RAD. PLENA	STEP BAIXA	EALN PLENA BAIXA
	MÉDIA	DLC	STEP MÉDIA	EALN DLC MÉDIA
		COEF. RAD	STEP MÉDIA	EALN CR MÉDIA
		RAD. PLENA	STEP MÉDIA	EALN PLENA MÉDIA
	ALTA	DLC	STEP ALTA	EALN DLC ALTA
		COEF. RAD	STEP ALTA	EALN CR ALTA
		RAD. PLENA	STEP ALTA	EALN PLENA ALTA
TST2_0-1	BAIXA	DLC	STEP BAIXA	EALN DLC BAIXA
		COEF. RAD	STEP BAIXA	EALN CR BAIXA
		RAD. PLENA	STEP BAIXA	EALN PLENA BAIXA
	MÉDIA	DLC	STEP MÉDIA	EALN DLC MÉDIA
		COEF. RAD	STEP MÉDIA	EALN CR MÉDIA
		RAD. PLENA	STEP MÉDIA	EALN PLENA MÉDIA
	ALTA	DLC	STEP ALTA	EALN DLC ALTA
		COEF. RAD	STEP ALTA	EALN CR ALTA
		RAD. PLENA	STEP ALTA	EALN PLENA ALTA
TC_1-0	BAIXA	DLC	STEP BAIXA	EALN DLC BAIXA
		COEF. RAD	STEP BAIXA	EALN CR BAIXA
		RAD. PLENA	STEP BAIXA	EALN PLENA BAIXA
	MÉDIA	DLC	STEP MÉDIA	EALN DLC MÉDIA
		COEF. RAD	STEP MÉDIA	EALN CR MÉDIA
		RAD. PLENA	STEP MÉDIA	EALN PLENA MÉDIA
	ALTA	DLC	STEP ALTA	EALN DLC ALTA
		COEF. RAD	STEP ALTA	EALN CR ALTA
		RAD. PLENA	STEP ALTA	EALN PLENA ALTA

Fonte: Autoria própria

Tendo em vista melhor precisão de resultados, todas as simulações foram realizadas 2 vezes. Isto permitiu verificar a confiabilidade dos resultados numéricos, que foram analisados duas vezes, assim como uma melhor avaliação do tempo de cálculo, já que pelas características multifuncionais dos computadores operando sistema Windows, podem ocorrer algumas diferenças de tempo de processamento, principalmente naqueles casos onde o tempo exigido é menor. Desta forma, os tempos de processamento analisados foram a média entre os dois valores obtidos, que na prática se revelaram bastante próximos.

O equipamento utilizado para todos os processamentos foi um *Notebook DELL Inspiron 14R 3650, com processador Intel Core I5 3337U de 1.8 GHz, com Memória RAM de 6 GB tipo DDR3, Disco Rígido de 1TeraByte, operando o Sistema Windows 8.1, em 64 bits.*

Todos os processamentos foram efetuados com a conexão de rede e o monitor anti-virus desativados, para que houvesse o mínimo de interferência da autonomia da máquina no gerenciamento de cálculos, seja por ação das conexões de rede, seja pela ação do anti-virus na grande operação de arquivos em disco. Ressalte-se que este é um equipamento bastante mediano, acessível a usuários não especializados, e que pode ser considerado relativamente modesto em relação aos padrões atuais de processamento avançado. Esta opção foi adotada para que fosse possível uma avaliação mais próxima do que consideramos ser a realidade de mercado da atuação profissional, mesmo daqueles com recursos medianos de processamento.

5.4.4 Apresentação e Comentário dos Resultados da Verificação da EALN

Os resultados da etapa de Verificação da EALN foram organizados e analisados segundo dois aspectos:

- a) Comparação dos resultados numéricos obtidos no cálculo da EALN através dos 3 Métodos conceituados para cada Modelo em cada Resolução.
- b) Comparação dos tempos de processamento dispendidos no cálculo da EALN através dos 3 Métodos conceituados para cada Modelo em cada Resolução.

Cada um destes aspectos será apresentado e comentado a seguir, especificando-se a métrica utilizada, o modo de apresentação dos resultados e os comentários sobre eles.

5.4.4.1 – Verificação dos Resultados Numéricos do Cálculo da EALN

Para a verificação dos resultados numéricos foram utilizadas 2 métricas consagradas já descritas no capítulo 2 para a organização e conferência dos resultados:

a) Daylight Autonomy – DA: entendida como a porcentagem de tempo de ocupação em um ano na qual a iluminância mínima requerida em um sensor é provida pela luz natural apenas. (REINHART et ali, 2006, p.16). Para estas verificações foram definidos 2 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 **DAn1** e **DAn2**. Os resultados são calculados a partir das iluminâncias de cada vértice, considerando-se o total de horas simuladas válidas (3.480 horas, no caso) como 100 %, computando-se cada hora acima de DA1 e DA2 e transformando o total de horas de cada DA em relação percentual ao total de horas.

b) Useful Daylight Illuminances - UDI: entendidas 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:

UDI₀ 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;

Com relação à verificação dos resultados das métricas em cada modelo, para cada resolução e segundo cada um dos métodos, foi feita uma análise envolvendo os Valores Médios, razão de

Divergência e Desvio Padrão em cada métrica, relacionando os Métodos CR e RADTOT com o Método DLC, no formato das razões CR/DLC e RADTOT/DLC, expressos nas Tabelas 19 (Modelo TST0), 20 (Modelo TST1), 21 (Modelo TST2) e 22 (Modelo TC), conforme descrito abaixo:

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 **DLCmed**, **CRmed**, **RADTOTmed**, 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).

Na coluna “**Resol.**” estão especificadas as resoluções Baixa, Média e Alta na qual foram processadas as visibilidades do Modelo. Na coluna “**Método**” estão discriminados os 3 Métodos de cálculo utilizados em cada Resolução segundo cada um dos indicadores de análise conforme descrito acima. As duas colunas seguintes dão os valores de DAN1 e DAN2 obtidos para cada um dos indicadores em cada método em cada resolução. As quatro próximas colunas apresentam os valores dos indicadores dos intervalos de UDI conforme descritos acima. Reservou-se a última coluna para o **Desvio Padrão Médio**, calculado no conjunto dos Desvios Padrões de cada métrica em cada método e em cada resolução.

Na Tabela 24 temos os resultados obtidos para o Modelo TST0_0-1 conforme a organização descrita acima.

Tabela 24: Modelo TST0_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	UDIinf	UDImed	UDIsup	DsvPdMed
TST0_0-1	DLCmed	33,4808	49,9239	26,8142	27,9646	32,9644	12,2568	
BAIXA	CRmed	33,4807	49,9239	26,8142	27,9646	32,9644	12,2568	
	CR DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	CR DP	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000004
	RADTOTmed	33,4807	49,9239	26,8142	27,9646	32,9644	12,2568	
	RADTOT DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	RADTOT DP	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000004
MÉDIA	DLCmed	33,5068	49,9410	26,7907	28,0149	32,9248	12,2697	
	CRmed	33,5069	49,9409	26,7907	28,0148	32,9249	12,2697	
	CR DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	CR DP	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,000043
	RADTOTmed	33,5069	49,9409	26,7907	28,0148	32,9249	12,2697	
	RADTOT DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
RADTOT DP	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,000043	
ALTA	DLCmed	33,4388	49,8711	26,9454	27,9140	32,8907	12,2499	
	CRmed	33,4387	49,8711	26,9453	27,9142	32,8905	12,2500	
	CR DI	1,0000	1,0000	0,9999	1,0001	1,0000	1,0000	
	CR DP	0,0000	0,0000	0,0009	0,0007	0,0001	0,0000	0,000295
	RADTOTmed	33,4387	49,8711	26,9453	27,9142	32,8905	12,2500	
	RADTOT DI	1,0000	1,0000	0,9999	1,0001	1,0000	1,0000	
RADTOT DP	0,0000	0,0000	0,0009	0,0007	0,0001	0,0000	0,000295	

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 25 temos os resultados obtidos para o Modelo TST1_0-1 conforme a organização descrita acima.

Tabela 25: Modelo TST1_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	UDIinf	UDImed	UDIsup	DsvPdMed
TST1_0-1	DLCmed	23,5003	38,0796	40,0514	26,1372	25,4562	8,3552	
BAIXA	CRmed	23,5003	38,0796	40,0514	26,1372	25,4562	8,3552	
	CR DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	CR DP	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000000
	RADTOTmed	23,5003	38,0796	40,0514	26,1372	25,4562	8,3552	
	RADTOT DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	RADTOT DP	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000000
MÉDIA	DLCmed	23,5176	38,0889	39,9883	26,1640	25,4685	8,3792	
	CRmed	23,5176	38,0890	39,9883	26,1640	25,4685	8,3792	
	CR DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	CR DP	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,000043
	RADTOTmed	23,5176	38,0890	39,9883	26,1640	25,4685	8,3792	
	RADTOT DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	RADTOT DP	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,000047
ALTA	DLCmed	23,5025	38,0757	39,9955	26,1708	25,4501	8,3836	
	CRmed	23,5025	38,0758	39,9955	26,1709	25,4499	8,3837	
	CR DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	CR DP	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002	0,000083
	RADTOTmed	23,5025	38,0758	39,9955	26,1709	25,4499	8,3837	
	RADTOT DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	RADTOT DP	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002	0,000083

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 26 temos os resultados obtidos para o Modelo TST2_0-1 conforme a organização descrita acima.

Tabela 26: Modelo TST2_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	UDIinf	UDImed	UDIsup	DsvPdMed
TST2_0-1	DLCmed	49,70626	72,73278	14,21408	17,63068	61,24499	6,91025	
BAIXA	CRmed	49,70634	72,73278	14,21409	17,63068	61,24499	6,91025	
	CR DI	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	
	CR DP	0,00004	0,00000	0,00000	0,00011	0,00003	0,00000	0,000030
	RADTOTmed	49,70630	72,73278	14,21409	17,63072	61,24495	6,91025	
	RADTOT DI	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	
	RADTOT DP	0,00003	0,00000	0,00000	0,00010	0,00002	0,00000	0,000026
MÉDIA	DLCmed	49,85671	72,81042	14,19301	17,54851	61,32207	6,93641	
	CRmed	49,85679	72,81034	14,19306	17,54851	61,32204	6,93641	
	CR DI	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	
	CR DP	0,00006	0,00003	0,00014	0,00019	0,00004	0,00000	0,000075
	RADTOTmed	49,85679	72,81034	14,19306	17,54851	61,32204	6,93641	
	RADTOT DI	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	
	RADTOT DP	0,00006	0,00003	0,00014	0,00019	0,00004	0,00000	0,000075
ALTA	DLCmed	49,79861	72,75760	14,20726	17,60363	61,24471	6,94439	
	CRmed	49,79881	72,75760	14,20712	17,60363	61,24487	6,94439	
	CR DI	1,00001	1,00000	0,99999	1,00000	1,00000	1,00000	
	CR DP	0,00008	0,00004	0,00016	0,00027	0,00006	0,00000	0,000104
	RADTOTmed	49,79881	72,75760	14,20712	17,60363	61,24487	6,94439	
	RADTOT DI	1,00001	1,00000	0,99999	1,00000	1,00000	1,00000	
	RADTOT DP	0,00008	0,00004	0,00016	0,00027	0,00006	0,00000	0,000104

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 27 temos os resultados obtidos para o Modelo TC_1-0 conforme a organização descrita acima.

Tabela 27: Modelo C_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	
BAIXA	CRmed	38,8904	51,7340	32,5744	18,9142	38,5897	9,9217	
	CR DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	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	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	RADTOT DP	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,000053
MÉDIA	DLCmed	38,9226	51,7881	32,5117	18,9285	38,6197	9,9401	
	CRmed	38,9225	51,7879	32,5118	18,9285	38,6196	9,9401	
	CR DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	CR DP	0,0002	0,0001	0,0001	0,0005	0,0004	0,0020	0,000549
	RADTOTmed	38,9226	51,7881	32,5116	18,9285	38,6196	9,9402	
	RADTOT DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
RADTOT DP	0,0000	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,000081	
ALTA	DLCmed	38,8943	51,7554	32,5604	18,9120	38,6020	9,9255	
	CRmed	38,8942	51,7553	32,5605	18,9120	38,6020	9,9255	
	CR DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	CR DP	0,0005	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001	0,0000	0,000185
	RADTOTmed	38,8944	51,7554	32,5604	18,9119	38,6021	9,9256	
	RADTOT DI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
RADTOT DP	0,0000	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0004	0,000140	

Fonte: Autoria própria.

A avaliação dos resultados numéricos para todos os 4 modelos, em todas as 3 resoluções e segundo os 3 métodos, sintetizados nas Tabelas 19 a 22 são enfáticos em demonstrar a coerência de cálculo entre os 3 métodos propostos. Pode-se claramente verificar que, para cada um dos 4 modelos em cada uma das 3 resoluções, os 3 métodos conduziram praticamente aos mesmos resultados, com insignificantes divergências que são atribuídas aos diferentes formatos de encadeamento das funções de cálculo utilizadas em cada método, que possuem precisões diferentes no ambiente de programação (operações básicas, cossenos, raízes e potenciações). Esta convergência de resultados era esperada a partir da hipótese inicial, já que cada um dos métodos partiu inicialmente da mesma estrutura de visibilidade prevista para cada modelo em uma dada resolução, mas utilizou diferentes funções em cada método para percorrer o mesmo “caminho” conceitual em busca da EALN.

Foi feita também uma avaliação da consistência espacial dos valores numéricos obtidos para a métrica adotada, onde foram produzidos, no próprio ambiente do APOLUX, gráficos de falsas cores dos resultados numéricos, apresentados numa escala geométrica em valores de 0% a 100%.

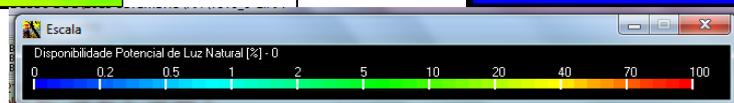
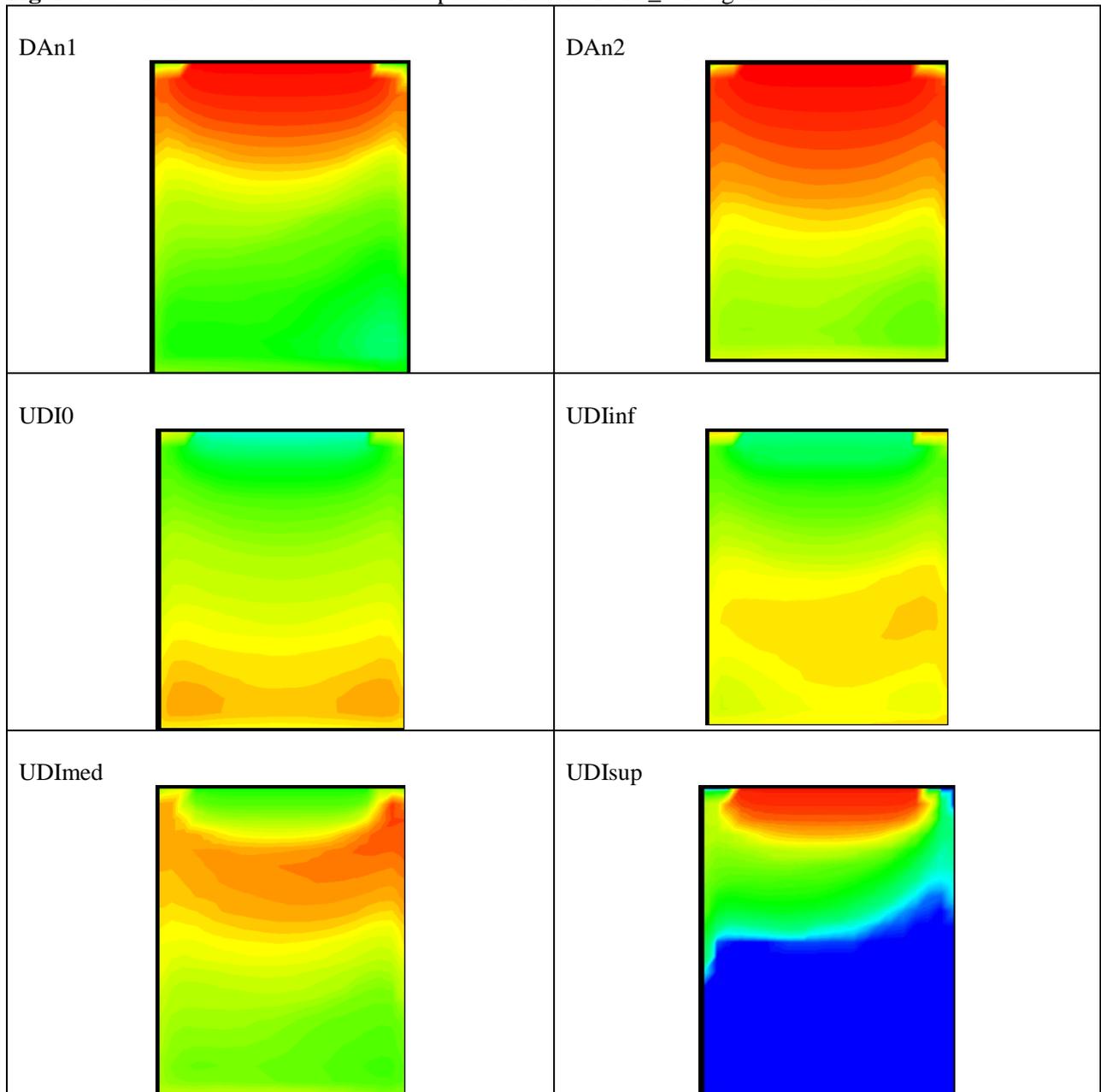
Foram produzidos gráficos de apenas 2 modelos para esta verificação. Entendemos que ela foi necessária para demonstrar a coerência espacial / temporal dos resultados numéricos obtidos, já que a pura e simples equivalência entre os resultados numéricos obtidos no cálculo utilizando os diferentes métodos não significa necessariamente que eles estivessem representando uma distribuição espacial coerente com o conhecimento qualitativo do comportamento do fenômeno, aspecto que o gráfico sobre a planta revelaria com maior clareza.

Foram selecionados os dois modelos considerados extremos: a) modelo TST0_0-1 que é o mais simples, com abertura sem proteção e espaço retangular; b) o modelo TC_1-0 que é o mais complexo e poderia mostrar também a coerência na análise qualitativa de um ambiente mais complexo.

Os gráficos produzidos, em número de 6 para cada modelo, representam a métrica utilizada nos cálculos, conforme faixas e valores descrito no item 5.4.4.1 deste capítulo: a) DAn1 = 500 lux; b) DAn2 = 250 lux; c) UDI0 menor que 100 lux; d) UDIinf entre 100 e 300 lux; e) UDImed entre 300 e 2.000 lux; f) UDIsup acima de 2.000 lux.

Os gráficos para o modelo TST0_0-1 estão mostrados na Figura 68:

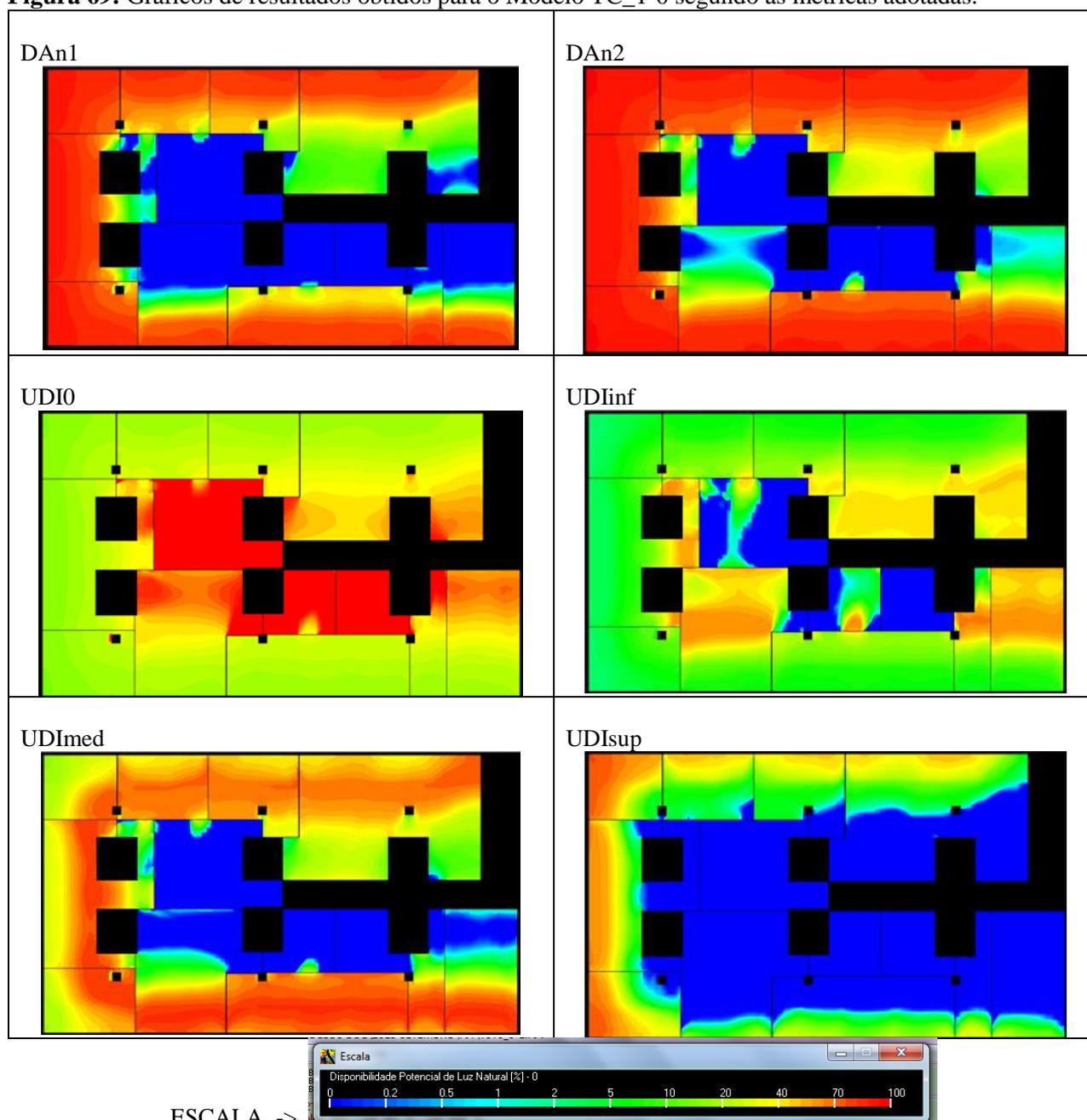
Figura 68: Gráficos de resultados obtidos para o Modelo TST0_0-1 segundo as métricas adotadas.



Fonte: Autoria própria (Apolux)

Os gráficos para o modelo TC_1-0 estão mostrados na Figura 69:

Figura 69: Gráficos de resultados obtidos para o Modelo TC_1-0 segundo as métricas adotadas.



ESCALA ->

Fonte: Autoria própria (Apolux)

A análise visual qualitativa dos gráficos obtidos para os dois modelos também mostraram grande coerência na distribuição espacial dos resultados calculados em cada uma das métricas adotadas, mostrando, particularmente quando analisamos a distribuição espacial dos diferentes intervalos da UDI, a complementaridade necessária às distribuições espaciais. No caso do modelo mais simples (TST0_0-1) é perfeitamente visível o enquadramento dos pontos de análise em intervalos coerentes de maior disponibilidade de luz, à medida em que desloca-se do fundo do ambiente para a região próxima das janelas. Esta mesma coerência demonstrou-se também na análise do modelo mais complexo (TC_1-0) quando analisamos a distribuição dos intervalos dos espaços mais interiores aos mais exteriores, como era esperado.

Uma vez que na comparação dos valores segundo os 3 métodos praticamente houve igualdade dentro de cada resolução para cada modelo, elaboramos ainda para dois modelos

analisados de característica mais complexa – TST2_0-1 e TC_1-0, uma verificação em gráficos numéricos entre os valores de resoluções diferentes para uma mesma métrica.

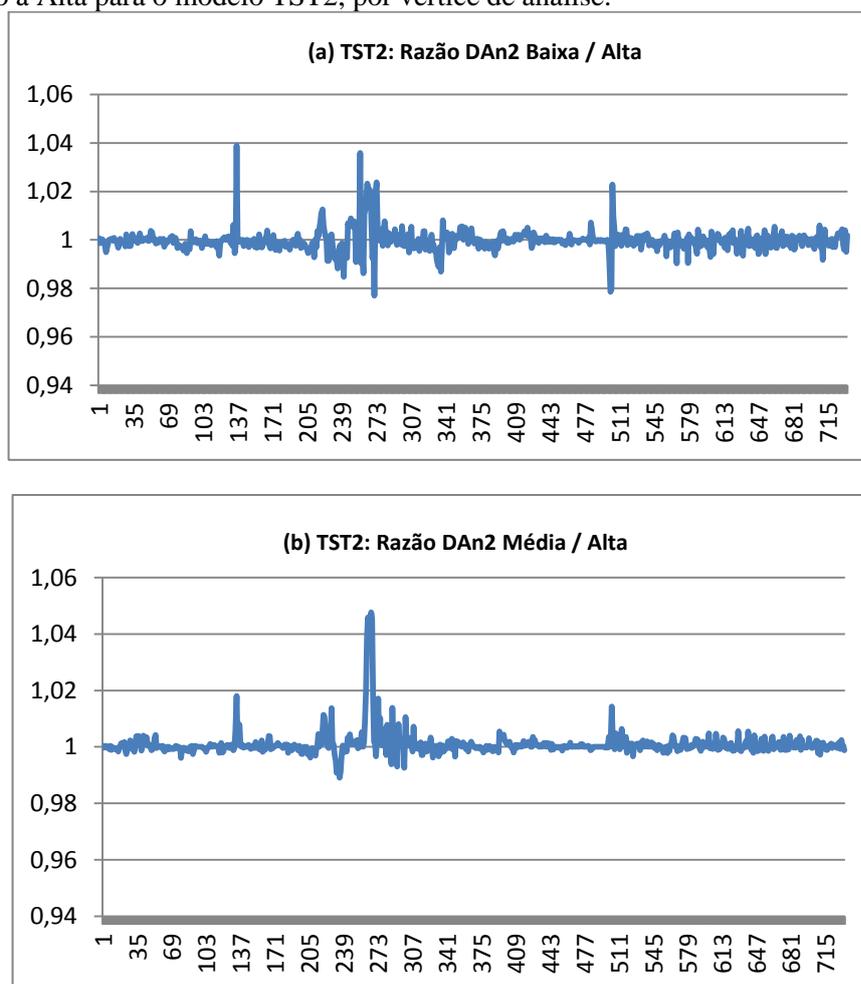
No DVD anexo, na Pasta “4 – VERIFICAÇÃO EALN” encontram-se as planilhas para os 4 modelos, onde são comparados, para cada um dos vértices, os valores obtidos nas resoluções Baixa (Globo 4) e Média (Globo 6) com relação à resolução Alta (Globo 8), fazendo-se a razão entre aquelas e esta. Nestas planilhas pode-se ver claramente a proximidade de valores. No Anexo C colocamos um segmento de uma das planilhas, para exemplo, já que o conjunto de todas são vastas listas numéricas.

Para maior clareza e síntese no corpo do texto do trabalho, elaboramos gráficos dos desvios de valores em cada vértice de análise para os modelos TST2_0-1 e TC_1-0, dividindo os valores das métricas em cada ponto de análise obtidos nas resoluções Baixa e Média pelos mesmos valores obtidos na resolução Alta. Foram comparados os valores das métricas DAn2, UDImed e UDIsup dividindo-se **Baixa / Alta** e **Média / Alta**.

Selecionamos estas métricas por representarem valores absolutos altos, medianos e baixos.

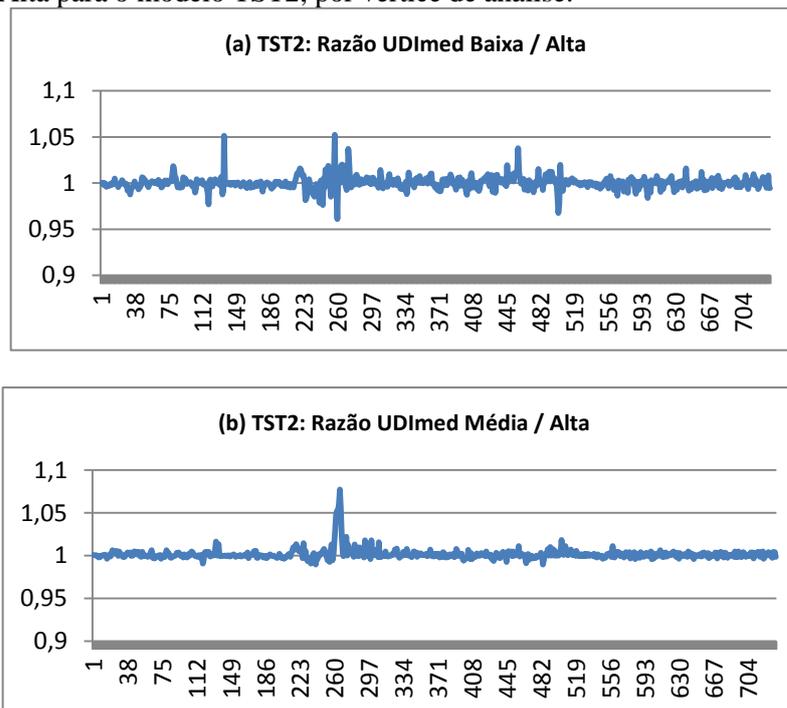
Os resultados obtidos nestas comparações estão representados nas Figuras 70 a 75 e serão novamente comentados ainda nas conclusões junto às considerações sobre a eficiência dos métodos. As Figuras 70, 71 e 72 referem-se ao Modelo TST2_0-1, para cada uma das métricas (**DAn2**, **UDImed**, **UDIsup**), mostrando os gráficos entre as razões **Baixa / Alta** (a) e **Média / Alta** (b). As Figuras 73, 74 e 75 representam os mesmos dados para o Modelo TC_1-0

Figura 70: Razão entre os valores de DAn2 calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TST2, por vértice de análise.



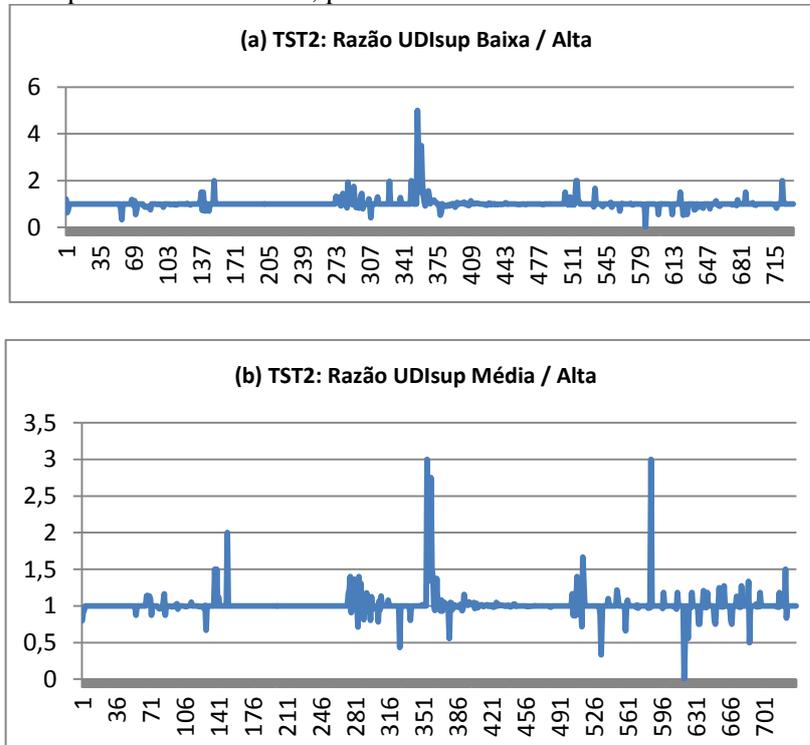
Fonte: Autoria própria.

Figura 71: Razão entre os valores de UDImed calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TST2, por vértice de análise.



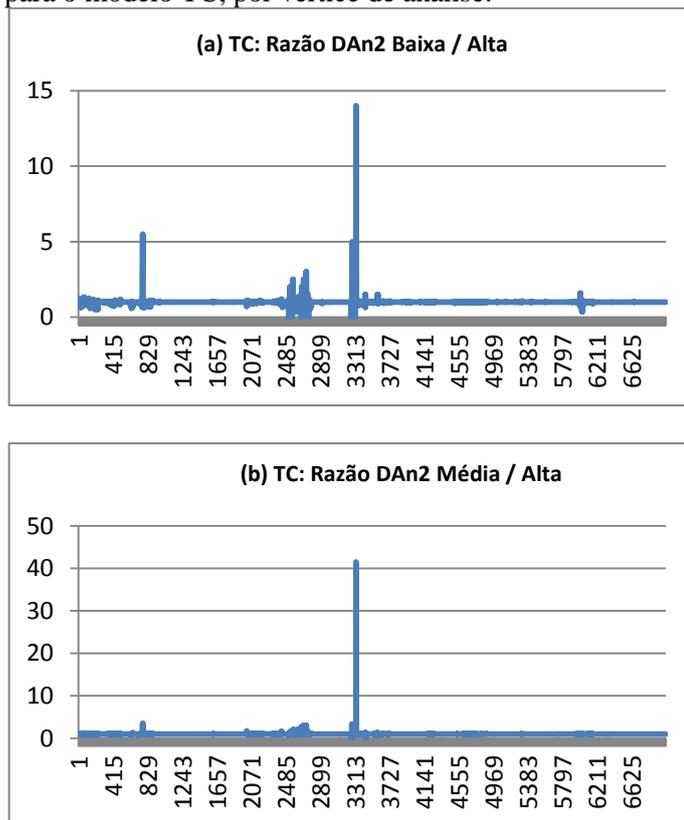
Fonte: Autoria própria.

Figura 72: Razão entre os valores de UDIsup calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TST2, por vértice de análise.



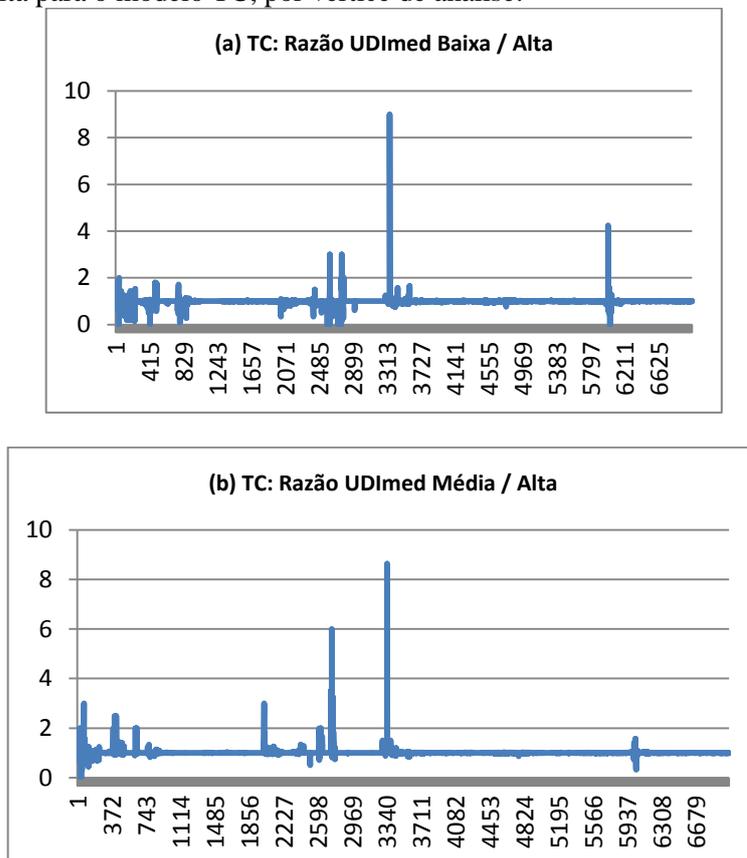
Fonte: Autoria própria.

Figura 73: Razão entre os valores de DAn2 calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TC, por vértice de análise.



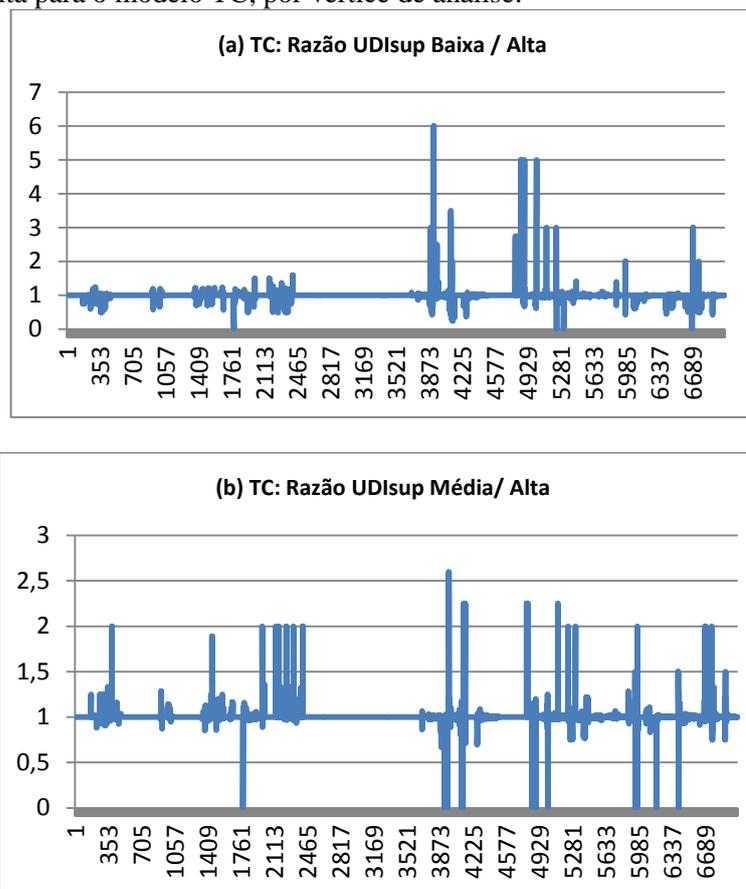
Fonte: Autoria própria.

Figura 74: Razão entre os valores de UDImed calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TC, por vértice de análise.



Fonte: Autoria própria.

Figura 75: Razão entre os valores de UDIsup calculados nas resoluções Baixa (a) e Média (b) em relação à Alta para o modelo TC, por vértice de análise.



Fonte: Autoria própria.

Observou-se que os valores divergentes obtidos na comparação do modelo TST2, com magnitude da ordem de 20 % ou mais, tiveram ocorrência muito baixa, estando a maioria na mesma faixa de valores obtidas em outros valores do conjunto de modelos x resoluções. As grandes variações que ocorreram nos valores da UDIsup, neste modelo, foram obtidos sobre uma base de comparação de valores absolutos muito pequenos, considerando que ocorreram valores válidos mas da ordem de grandeza respectivamente de 0,1149%, 0,2874% e 0,4885%, o que fez com que uma pequena variação nestes resultados nas diferentes resoluções tenham percentuais equivalentes relativamente altos. Quando os valores são superiores, as diferenças percentuais diminuem para patamares bastante semelhantes a todos os outros casos.

Ainda com relação à verificação dos resultados das métricas segundo cada modelo, foi feita também uma análise envolvendo os Valores Médios, razão de Divergência e Desvio Padrão em cada métrica, relacionando também as resoluções Baixa e Média com a Alta, expressa na Tabela 28, conforme descrito abaixo:

Para cada modelo foi considerado apenas o método do DLC como referência, já que os valores numéricos dos 3 métodos convergiram. Foi realizado para este método o seguinte procedimento:

a) Determinação, em cada métrica, e em cada resolução, do valor médio da métrica (identificados como **G8 mdV**, **G6 mdV** e **G4 mdV**, na Tabela)

b) Determinação, em cada métrica, da razão simples entre os valores absolutos de cada vértice de análise nas resoluções Média/Alta e Baixa/Alta, considerado como índice de Divergência, significando o valor 1 como igualdade dos resultados e calculando-se, para cada métrica o valor da Divergência Média (**G6 mdDI** e **G4 mdDI**) assim como o Desvio Padrão dos valores da métrica em relação à sua Divergência Média (**G6 DP** e **G4 DP**), tendo sido calculado ainda o Desvio Padrão

Médio (DvPdMd) entre as divergências de cada métrica em relação a cada razão (Média/Alta e Baixa/Alta).

Tabela 28: Valores de Média das Métricas, Média das Divergências e Desvio Padrão das Divergências em cada razão (Média/Alta e Baixa/Alta) para cada Modelo.

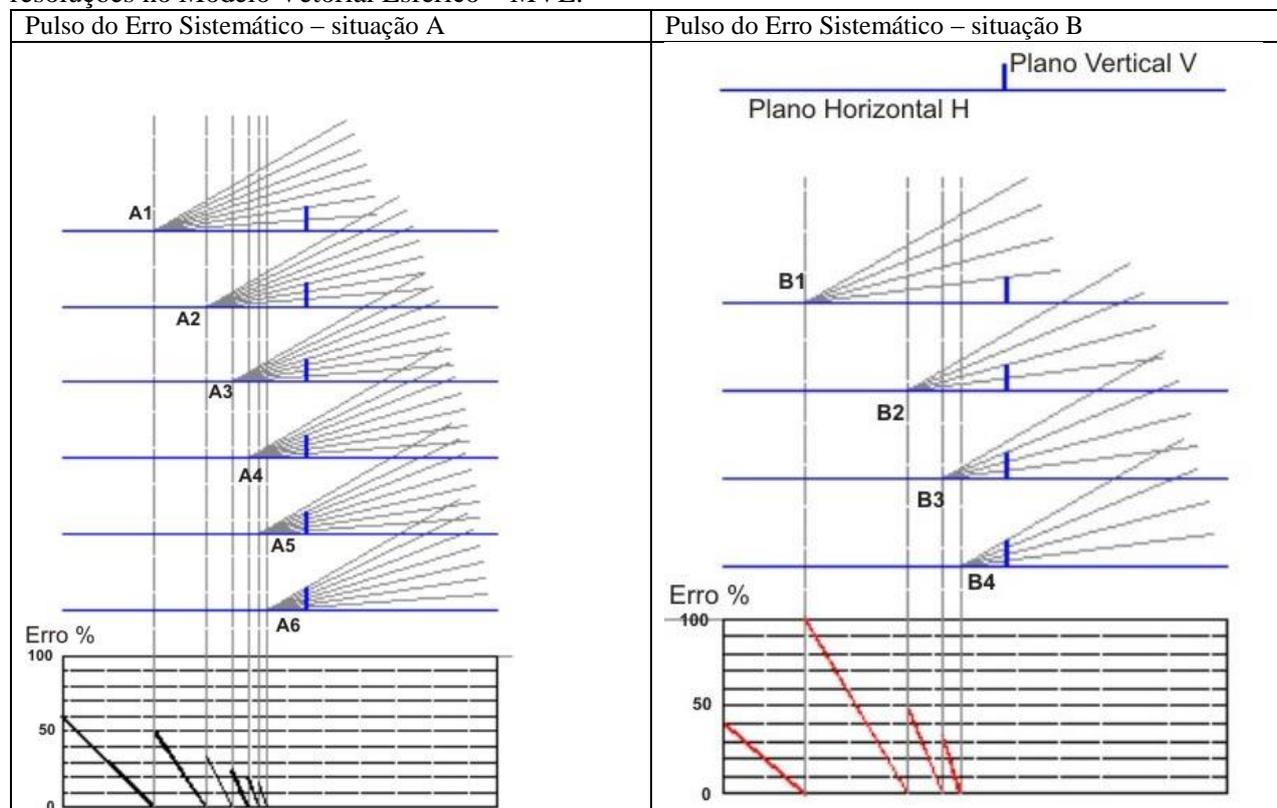
MODELO	RESOLUÇÃO	DAn1	DAn2	UDI0	UDInf	UDImed	UDIsup	DvPdMd
TST0 462 Vert. Ana.	G8 mdV	33,4388	49,8711	26,9454	27,9140	32,8907	12,2499	
	G6 mdV	33,5068	49,9410	26,7907	28,0149	32,9248	12,2697	
	G6 mdDI	1,0056	1,0030	0,9965	1,0021	1,0019	0,9838	
	G6 DP	0,0205	0,0104	0,0089	0,0097	0,0115	0,1361	0,0329
	G4 mdV	33,4808	49,9239	26,8142	27,9646	32,9644	12,2568	
	G4 mdDI	1,0012	1,0008	0,9960	0,9999	1,0023	1,0505	
	G4 DP	0,0295	0,0170	0,0135	0,0147	0,0201	0,3340	0,0715
TST1 462 Vert. Ana.	G8 mdV	23,5025	38,0757	39,9955	26,1708	25,4501	8,3836	
	G6 mdV	23,5176	38,0889	39,9883	26,1640	25,4685	8,3792	
	G6 mdDI	1,0282	1,0029	0,9997	0,9993	1,0020	1,0112	
	G6 DP	0,3997	0,0416	0,0088	0,0113	0,2137	0,1432	0,1364
	G4 mdV	23,5003	38,0796	40,0514	26,1372	25,4562	8,3552	
	G4 mdDI	1,0557	0,9974	1,0007	0,9979	1,0423	1,0282	
	G4 DP	0,6043	0,0818	0,0176	0,0198	0,6644	0,2781	0,2777
TST2 734 Vert. Ana.	G8 mdV	49,7986	72,7576	14,2073	17,6036	61,2447	6,9444	
	G6 mdV	49,8567	72,8104	14,1930	17,5485	61,3221	6,9364	
	G6 mdDI	1,0017	1,0009	0,9991	0,9976	1,0015	1,0142	
	G6 DP	0,0111	0,0046	0,0055	0,0082	0,0063	0,1692	0,0342
	G4 mdV	49,7063	72,7328	14,2141	17,6307	61,2450	6,9103	
	G4 mdDI	0,9980	0,9997	1,0008	1,0013	1,0002	1,0248	
	G4 DP	0,0163	0,0045	0,0075	0,0113	0,0069	0,2542	0,0501
TC 7.038 Vert. Ana.	G8 mdV	38,8949	51,7582	32,5672	18,9014	38,6025	9,9290	
	G6 mdV	38,9226	51,7881	32,5117	18,9285	38,6197	9,9401	
	G6 mdDI	1,0016	1,0129	0,9986	1,0092	1,0078	1,0032	
	G6 DP	0,0893	0,4918	0,0062	0,3037	0,1458	0,0911	0,1880
	G4 mdV	38,8906	51,7341	32,5743	18,9142	38,5898	9,9218	
	G4 mdDI	1,0031	0,9946	0,9998	1,0071	0,9917	1,0003	
	G4 DP	0,1961	0,1933	0,0105	0,4019	0,1450	0,1632	0,1850

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados demonstram a forte associação causada pelo método de elementos finitos utilizado no MVE quando relacionado a valores de pequena monta. Observa-se que a divergência média (DI) com exceção de um valor em torno de 6%, nos demais casos todos foi bastante insignificante. Quando analisamos o Desvio Padrão, no entanto, observa-se no geral que quando a base média de valores absolutos é menor o Desvio Padrão é maior. No entanto considerado o Desvio Padrão Médio entre as diferentes métricas, os valores são diferenciados. No ambiente mais complexo situou-se entre 18% e 19%. Observa-se que há desvios médios diferenciados, não necessariamente associando resolução maior e menor complexidade, que aparentemente deveriam ser proporcionais. No entanto, observamos que as resoluções escalonadas no MVE não significam proporções de sub-conjuntos: o ângulo sólido de uma direção em um globo de maior resolução não é uma subdivisão de uma direção de um globo de menor resolução. Assim as descrições de visibilidade podem variar. Além disso, como citamos na revisão bibliográfica, Carvalho (2009) demonstrou que um globo de menor resolução pode descrever com mais precisão um Fator de

Forma do que um globo de maior resolução, no que denominou em sua dissertação de Pulso de Erro Sistemático, conforme ilustrado na Figura 76. Observe-se que este erro ocorre aleatoriamente e com muito menos frequência que as divergências mais lineares de acordo com a resolução.

Figura 76: Ilustração de Pulso de Erro Sistemático na determinação dos Fatores de Forma em diferentes resoluções no Modelo Vetorial Esférico – MVE.



Fonte: Carvalho (2009).

Esta análise dos resultados obtidos na comparação entre as diferentes resoluções demonstram a importância de buscarmos sempre trabalhar com a resolução mais elevada dentro do contexto de gasto de tempo com processamento.

5.4.4.2 Verificação dos Tempos de Processamento do Cálculo da EALN

Todo o processamento realizado nos modelos para avaliação dos resultados numéricos e espaciais relatados no tópico anterior foi monitorado em termos do tempo gasto em cada uma das etapas de processamento de cada modelo em cada resolução segundo cada método. Durante o processamento procurou-se garantir que não houvesse nenhuma interferência de usuários, de sorte que a máquina ficasse dedicada exclusivamente ao cálculo. Conforme citado anteriormente, os procedimentos de cálculo foram realizados duas vezes em cada situação, para garantir a consistência dos resultados em algum eventual lapso de processamento. O tempo analisado foi a média entre os dois resultados obtidos em cada situação. Ao final, os tempos de processamento foram muito similares.

O formato de dado utilizado para compor os resultados e organizar as tabelas de análise foi o formato *tothorash totmin'*, por exemplo, 01h 33' significam 1 hora e 33 minutos, ou então 20h 46' representando 20 horas e 46 minutos. Os resultados comparativos para cada um dos modelos encontram-se sintetizados nas Tabelas 29 a 32.

Na Tabela 29 temos os tempos de processamento obtidos para o Modelo TST0_0-1, que variaram de um mínimo de 17', obtido com o Método dos Coeficientes de Radiosidade na Resolução Baixa (Globo 4), até um máximo de 6 h 26', obtido com o Método do DLC na

Resolução Alta (Globo 8). Neste modelo, em cada uma das 3 resoluções, o método mais eficiente foi o de Coeficientes de Radiosidade (em destaque na Tabela).

Tabela 29: Comparativo entre os tempos de processamento por etapa e total para o Modelo TST0_0-1, para cada uma das 3 Resoluções, segundo cada um dos 3 Métodos, destacado o mais rápido.

RESOLUÇÃO	MÉTODO	VISIBIL.	COEFIC.	STEPS	EALN	TOTAL
GLOBO 4	DLC	00h 01'	00h 33'	00h 02'	00h 02'	00h 38'
	CR	00h 01'	00h 12'	00h 02'	00h 02'	00h 17'
	RAD TOT	00h 01'	00h 00'	00h 02'	00h 59'	01h 02'
GLOBO 6	DLC	00h 03'	01h 57'	00h 04'	00h 09'	02h 13'
	CR	00h 03'	00h 13'	00h 04'	00h 05'	00h 25'
	RAD TOT	00h 03'	00h 00'	00h 04'	01h 08'	01h 15'
GLOBO 8	DLC	00h 08'	05h 48'	00h 05'	00h 22'	06h 23'
	CR	00h 08'	00h 14'	00h 05'	00h 13'	00h 40'
	RAD TOT	00h 08'	00h 00'	00h 05'	01h 20'	01h 33'

Fonte: Autoria própria (Apolux)

Na Tabela 30 temos os tempos de processamento obtidos para o Modelo TST1_0-1, que variaram de um mínimo de 22', obtido com o Método dos Coeficientes de Radiosidade na Resolução Baixa (Globo 4), até um máximo de 9 h 48', obtido com o Método do DLC na Resolução Alta (Globo 8). Também neste modelo, em cada uma das 3 resoluções, o método mais eficiente foi o de Coeficientes de Radiosidade (em destaque na Tabela).

Tabela 30: Comparativo entre os tempos de processamento por etapa e total para o Modelo TST1_0-1, para cada uma das 3 Resoluções, segundo cada um dos 3 Métodos, destacado o mais rápido.

RESOLUÇÃO	MÉTODO	VISIBIL.	COEFIC.	STEPS	EALN	TOTAL
GLOBO 4	DLC	00h 01'	00h 48'	00h 02'	00h 03'	00h 54'
	CR	00h 01'	00h 16'	00h 02'	00h 03'	00h 22'
	RAD TOT	00h 01'	00h 00'	00h 02'	01h 20'	01h 23'
GLOBO 6	DLC	00h 04'	03h 02'	00h 04'	00h 10'	03h 20'
	CR	00h 04'	00h 19'	00h 04'	00h 08'	00h 35'
	RAD TOT	00h 04'	00h 00'	00h 04'	01h 25'	01h 33'
GLOBO 8	DLC	00h 10'	09h 04'	00h 05'	00h 29'	09h 48'
	CR	00h 10'	00h 20'	00h 05'	00h 22'	00h 57'
	RAD TOT	00h 10'	00h 00'	00h 05'	01h 43'	01h 58'

Fonte: Autoria própria (Apolux)

Na Tabela 31 temos os tempos de processamento obtidos para o Modelo TST2_0-1, que variaram de um mínimo de 1 h 15', obtido com o Método dos Coeficientes de Radiosidade na Resolução Baixa (Globo 4), até um máximo de 35 h 15', obtido com o Método do DLC na Resolução Alta (Globo 8). Neste modelo, em cada uma das 3 resoluções, o método mais eficiente foi o de Coeficientes de Radiosidade (em destaque na Tabela).

Tabela 31: Comparativo entre os tempos de processamento por etapa e total para o Modelo TST2_0-1, para cada uma das 3 Resoluções, segundo cada um dos 3 Métodos, destacado o mais rápido.

RESOLUÇÃO	MÉTODO	VISIBIL.	COEFIC.	STEPS	EALN	TOTAL
GLOBO 4	DLC	00h 03'	02h 39'	00h 02'	00h 05'	02h 49'
	CR	00h 03'	01h 03'	00h 02'	00h 07'	01h 15'
	RAD TOT	00h 03'	00h 00'	00h 02'	02h 25'	02h 30'
GLOBO 6	DLC	00h 07'	11h 50'	00h 04'	00h 19'	12h 20'
	CR	00h 07'	01h 20'	00h 04'	00h 16'	01h 47'
	RAD TOT	00h 07'	00h 00'	00h 04'	03h 12'	03h 23'
GLOBO 8	DLC	00h 18'	33h 59'	00h 05'	00h 53'	35h 15'
	CR	00h 18'	01h 21'	00h 05'	00h 42'	02h 26'
	RAD TOT	00h 18'	00h 00'	00h 05'	03h 50'	04h 13'

Fonte: Autoria própria (Apolux)

Na Tabela 32 temos os tempos de processamento obtidos para o Modelo TC_1-0, que variaram de um mínimo de 17 h 59', obtido com o Método da Radiosidade Total na Resolução Baixa (Globo 4), até um máximo de 267 h 50', obtido com o Método do DLC na Resolução Alta (Globo 8). Neste modelo, em cada uma das 3 resoluções, o método mais eficiente foi o da Radiosidade Total (em destaque na Tabela).

Tabela 32: Comparativo entre os tempos de processamento por etapa e total para o Modelo TC_1-0, para cada uma das 3 Resoluções, segundo cada um dos 3 Métodos, destacado o mais rápido.

RESOLUÇÃO	MÉTODO	VISIBIL.	COEFIC.	STEPS	EALN	TOTAL
GLOBO 4	DLC	00h 31'	19h 57'	00h 02'	00h 16'	20h 46'
	CR	00h 31'	37h 11'	00h 02'	05h 52'	43h 36'
	RAD TOT	00h 31'	00h 00'	00h 02'	17h 26'	17h 59'
GLOBO 6	DLC	01h 06'	109h 45'	00h 04'	01h 23'	112h 18'
	CR	01h 06'	54h 50'	00h 04'	08h 50'	64h 50'
	RAD TOT	01h 06'	00h 00'	00h 04'	22h 24'	23h 34'
GLOBO 8	DLC	02h 28'	261h 33'	00h 05'	03h 44'	267h 50'
	CR	02h 28'	60h 02'	00h 05'	16h 22'	78h 57'
	RAD TOT	02h 28'	00h 00'	00h 05'	33h 22'	35h 55'

Fonte: Autoria própria (Apolux)

Na Tabela 33 temos o comparativo entre os tempos totais de processamento obtidos para cada um dos Modelos, em cada Resolução segundo cada Método, destacando-se para cada modelo em cada resolução qual o método que foi mais eficiente. Pode-se claramente observar que no caso dos 3 modelos mais simples, com menor número de vértices, o método dos Coeficientes de Radiosidade foi o mais eficiente, como inicialmente previsto. No caso do modelo mais complexo, com maior número de vértices, o processamento mais rápido foi o da Radiosidade Total, dado que o número de horas a processar era a menor referência em relação aos vértices e direções do Globo.

Tabela 33: Comparativo entre os tempos de processamento totais gastos no processamento de cada Modelo, em cada uma das 3 Resoluções, segundo cada um dos 3 Métodos, destacado o mais rápido.

RESOLUÇÃO	MÉTODO	TST0_0-1.	TST1_0-1.	TST2_0-1.	TC_1-0
GLOBO 4	DLC	00h 38'	00h 54'	02h 49'	20h 46'
	CR	00h 17'	00h 22'	01h 15'	43h 36'
	RAD TOT	01h 02'	01h 23'	02h 30'	17h 59'
GLOBO 6	DLC	02h 13'	03h 20'	12h 20'	112h 18'
	CR	00h 25'	00h 35'	01h 47'	64h 50'
	RAD TOT	01h 15'	01h 33'	03h 23'	23h 34'
GLOBO 8	DLC	06h 23'	09h 48'	35h 15'	267h 50'
	CR	00h 40'	00h 57'	02h 26'	78h 57'
	RAD TOT	01h 33'	01h 58'	04h 13'	35h 55'

Fonte: Autoria própria (Apolux)

Para uma melhor compreensão dos procedimentos, o processamento indicou, para cada simulação, o número de direções da abóbada visualizadas assim como o número de vértices opacos difusos que visualizam pelo menos uma direção do céu. O número de horas simuladas para a determinação da EALN em todos os casos foi de 3.480 horas, o que era de se esperar, já que o procedimento de conversão do arquivo climático para os dados de tipos de céu dependeu apenas dos dados da localidade e dos descritores do arquivo, que foram os mesmos em todos os casos.

Na Tabela 34 apresenta-se, finalmente, uma síntese geral dos tempos totais de processamento de cada modelo, neste caso convertidos em minutos, relacionado ao número de unidades processadas em cada método / resolução: a) direções visualizadas nos DLCs; b) vértices que visualizam céu nos Coeficientes de Radiosidade; c) horas anuais simuladas na Radiosidade Total. O tempo médio unitário em cada situação foi calculado pela razão entre tempo de processamento e unidade processadas.

Na coluna de **Resolução** temos indicado para cada Globo o número total de direções; na coluna **Método** temos, para cada resolução, os 3 métodos indicando uma linha para o tempo (minutos), outra linha para as unidades (direções, vértices ou horas processados) e outra linha para o tempo médio unitário; nas colunas correspondentes a cada modelo estão então os valores absolutos de tempo processado, número de unidades e tempo médio unitário em cada resolução para cada método.

Pode-se observar que os tempos unitários de processamento estão na casa de centésimos de minutos, ou pouco mais ou menos de um segundo, no caso dos modelos mais simples e menor resolução, até décimos de minutos nos casos mais demorados, o que pode ser considerado um tempo bastante eficiente face ao volume de dados processados, à precisão obtida e ao equipamento mediano intencionalmente usado.

Observa-se do conjunto de resultados de tempos de processamento entre os diferentes modelos que se verificou a hipótese inicial de que métodos diferenciados segundo a perspectiva de volume de elementos a processar é uma abordagem consistente e correta, podendo implicar em diferenças de até cerca de 7,5 vezes o tempo de processamento sem qualquer prejuízo no resultado entre os diferentes métodos.

Tabela 34: Tempos de processamento por elementos unitários, em minutos por unidade, para cada modelo em cada resolução segundo cada método.

RESOLUÇÃO	MÉTODO	TST0_0-1.	TST1_0-1.	TST2_0-1.	TC_1-0
		1.672 vert	2.032 vert	3.614 vert	22.918 vert
GLOBO 4 8.151 dir	DLC (min)	38	54	169	1.246
	DLC (dir)	4.044	5.250	8.038	8.151
	DLC (min/dir)	0,0093966	0,0102857	0,0210251	0,1528647
	CR (min)	17	22	75	2.616
	CR (vert)	780	1.140	2.055	18.576
	CR (min/vert)	0,0217949	0,0192982	0,0364964	0,1408269
	RADTOT (min)	63	83	150	1.079
	RADTOT (hora)	3.480	3.480	3.480	3.480
	RADTOT (min/hora)	0,0181034	0,0238506	0,0431034	0,3100575
GLOBO 6 26.335 dir	DLC (min)	133	200	740	6.738
	DLC (dir)	13.120	16.986	25.987	26.335
	DLC (min/dir)	0,0101372	0,0117744	0,0284758	0,2558572
	CR (min)	25	36	107	3.890
	CR (vert)	795	1.155	2.087	18.633
	CR (min/vert)	0,0314465	0,0311688	0,0512698	0,2087694
	RADTOT (min)	75	93	203	1.414
	RADTOT (hora)	3.480	3.480	3.480	3.480
	RADTOT (min/hora)	0,0215517	0,0267241	0,0583333	0,4063218
GLOBO 8 73.099 dir	DLC (min)	383	588	2.115	16.070
	DLC (dir)	36.472	47.159	72.054	73.099
	DLC (min/dir)	0,0105012	0,0124685	0,0293530	0,2198388
	CR (min)	40	57	146	4.737
	CR (vert)	797	1.155	2.112	18.641
	CR (min/vert)	0,0501882	0,0493506	0,0691288	0,2541173
	RADTOT (min)	93	118	253	2.155
	RADTOT (hora)	3.480	3.480	3.480	3.480
	RADTOT (min/hora)	0,0267241	0,0339080	0,0727011	0,6192529

Fonte: Autoria própria (Apolux)

Apresentadas as verificações realizadas e comentados os seus resultados, passamos à parte de Conclusões deste trabalho.

6 CONCLUSÕES

Relembramos nossa hipótese inicial de que, considerando-se a necessidade de estudos de ambientes complexos em geometria e caracterização de materiais, o Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade permite uma abordagem alternativa ao DLC, abordagem esta baseada num comportamento padrão de trocas luminosas entre as superfícies do ambiente que foi no trabalho definida como Coeficientes de Radiosidade - CR. Nossa hipótese é de que esta abordagem será mais eficiente e permitirá estudos de maior precisão em menos tempo, sendo que foi investigada ainda a possibilidade que alternativamente até mesmo a abordagem de Radiosidade Plena seja mais eficiente que ambos os coeficientes, DLC e CR.

A partir desta hipótese foi traçado como Objetivo Geral:

“Propor um novo método de determinação de **Estimativa Anual de Luz Natural – EALN** para ambientes complexos, baseada em arquivos climáticos e calculada a partir de **Coeficientes de Radiosidade** ou de **Radiosidade Plena** alternativamente ao Daylight Coefficient - DLC, utilizando os Padrões de Céu da Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E 2003”.

Dentro deste Objetivo Geral foram definidos como Objetivos Específicos:

- “- Conceituar um método para seleção do Padrão de Céu mais adequado da norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E 2003 a partir de descritores extraídos de arquivos climáticos digitais.
- Conceituar as abordagens do Coeficiente de Radiosidade e da Radiosidade Plena como alternativas ao método do Daylight Coeficiente – DLC - clássico.
- Analisar comparativamente a eficiência de cada um dos métodos segundo diferentes graus de complexidade dos ambientes.”

A partir das verificações realizadas sobre as conceituações propostas neste trabalho, as conclusões serão aqui apresentadas inicialmente com a análise de cada objetivo específico seguindo-se o Objetivo Geral, como segue.

Como referência de avaliação dos resultados neste trabalho consideramos a afirmação de Dogan et ali (2012), de que a margem de erro a que está submetido o programa Daysim na determinação das iluminâncias horárias interiores encontra-se na faixa entre 6% e 26%. Desta forma, consideramos que divergências até 10% são bastante aceitáveis, sendo também aceitável a ocorrência com menor frequência de erros até 25%.

No entanto, ressaltamos que não é objetivo deste trabalho estabelecer comparações relação ao programa Daysim, e sim avaliar procedimentos metodológicos para realizar tarefas similares ao desse programa, que partem entretanto de outros procedimentos metodológicos também validados, como procurou-se demonstrar neste trabalho.

6.1 SOBRE O MÉTODO DE SELEÇÃO DOS PADRÕES DE CÉU

O conceito proposto para conversão das informações dos arquivos climáticos em dados de caracterização do tipo de céu segundo um dos 15 Modelos normalizados envolveu dois aspectos que foram verificados no trabalho. O primeiro refere-se à confiabilidade do método de conversão dos dados de radiação em dados de iluminação baseado numa interpretação da aplicação das fórmulas de conversão luminosa do Modelo de Perez, conforme descrito. O segundo refere-se ao procedimento de análise dos diferentes descritores derivados dos dados de iluminação para a caracterização de um dos 15 modelos de céu normalizados, associando-se ao tipo selecionado as informações necessárias para a caracterização da distribuição de luminâncias da abóbada.

6.1.1 Sobre a Consistência das Conversões de Radiação em Iluminação

Esta verificação envolveu a consistência de obtenção dos dados das Iluminâncias Horizontais Global, Difusa e Direta a partir dos dados de Radiação equivalentes de cada uma, além da Predição da Luminância do Zenith. Envolveu arquivos climáticos de 26 cidades brasileiras fornecidos pelo LABEEE, do qual foi selecionado um subconjunto de 10 cidades onde foram analisados também os arquivos climáticos fornecidos pelo site do EnergyPlus, sendo que deste site também foram selecionados arquivos de 6 cidades localizadas em outros países e continentes. Todos continham dados de Iluminação já inscritos e atualizados que foram considerados como referências corretas, apesar de não se ter exatamente a informação de sua fonte de elaboração. Lembramos que a plena aplicação do Modelo de Perez (PEREZ et ali,1990) utiliza variáveis que podem ser obtidas por diferentes métodos resultando em valores próximos, mas distintos, e que não estavam presentes na bibliografia resultante de nossa revisão.

A ampla avaliação dos resultados de conversão, que foram sintetizadas no capítulo de verificação, demonstrou claramente que as formulações de conversão aplicadas às grandezas Iluminância Horizontal Global e Iluminância Horizontal Difusa apresentaram na grande maioria dos casos uma proximidade muito grande com os valores apresentados no arquivo, com maior precisão nos horários com ângulo solar mais próximo do Zenith, correspondente aos horários de maior luminosidade, e maior divergência nos horários de ângulo solar mais próximos do horizonte. Considerando-se que o objetivo é uma análise anual feita hora a hora, pode-se avaliar a partir dos gráficos que para estas duas grandezas nos horários de maior intensidade luminosa as divergências são bem inferiores a 10%, enquanto que nos horários de menor luminosidade a divergência é mais próxima de 10% ou mesmo superior. No conjunto a divergência deve situar-se significativamente abaixo de 10%, o que pode ser considerado bastante aceitável para um modelo que lida com grandezas bastante imprecisas.

Já quanto à Iluminância Horizontal Direta e à Luminância do Zenith os resultados foram bastante variados, em alguns casos bastante próximos, em outros com divergências bastante aleatórias. No caso da Iluminância Horizontal Direta houve em boa parte dos casos uma divergência significativa enquanto que em outros houve maior convergência. No caso da Luminância do Zenith, lembrando que a formulação é uma predição e não uma conversão, as divergências foram bastante significativas em boa parte dos casos, enquanto que noutros foi bastante próxima.

Os resultados destes testes mostram a viabilidade de se utilizar os dados convertidos de Iluminância Horizontal Global e Iluminância Horizontal Difusa, quando eles não estão presentes diretamente no arquivo climático, podendo-se supor que seu uso implicará num erro geralmente abaixo de 10%.

Conforme demonstrado nesta verificação, a adoção destas duas grandezas como referência para determinar a Iluminância Horizontal Direta seria então o melhor procedimento. Por outro lado, a Luminância predita do Zenith demonstrou-se bastante inconsistente na comparação, tendo sido então descartada como grandeza diretamente utilizável, mesmo na etapa posterior de determinação dos tipos de céu normalizados, tendo sido então utilizados neste caso modelos analíticos para sua predição, conforme conceituado para a etapa seguinte de desenvolvimento do modelo.

Observamos ainda nestas conclusões que mesmo os dados de luminosidade já presentes nos arquivos EPW utilizados não apresentavam a coerência matemática entre o valor Global e o valor da soma (Difusa + Direta) que será necessária posteriormente ao tratamento dos modelos de caracterização dos tipos de céu.

Observamos ainda que todos os arquivos consultados, que envolveu um universo maior que o selecionado para a mostra deste estudo, continham já os dados de luminosidade, o que em princípio dispensaria um método de conversão dos dados de radiação. No entanto considerou-se necessário este procedimento para que no ambiente do Programa APOLUX o usuário pudesse dispor de algum arquivo que eventualmente não contivesse estes dados.

6.1.2 Sobre o Algoritmo de Interpretação dos Dados Luminosos e Seleção do Tipo de Céu.

Tomamos como referência nas conclusões deste tópico a afirmação de Reinhart: “A combinação do Radiance com os Daylight Coefficients de Perez podem eficiente e seguramente modelar séries temporais anuais de iluminância com um erro médio relativo de 20%” (REINHART, 2012, slide 13/23).

Também nos referenciamos na afirmação de Dogan, Reinhart e Michalatos (2012), considerando resultados entre 7% a 18% de Erro Quadrático Médio (RMSE) obtidos no estudo de seu método para estimativas urbanas, como valores aceitáveis dentro do intervalo de erro que considera validado para o Daysim / Radiance, entre 6% e 26%.

Ainda lembramos os resultados obtidos por Reinhart e Herkel (2000), onde comparando seis métodos distintos consideraram aceitáveis os erros obtidos através da modelagem do DLC com Desvios Padrões (RSME – Erro Quadrático Médio) entre 16% e 22%.

Pelos resultados demonstrados nas verificações realizadas considera-se que o procedimento de aplicação do algoritmo de seleção dos tipos de céu é totalmente consistente com a proposição conceitual apresentada em 4.1.

Nesta verificação o algoritmo demonstrou-se bastante consistente em selecionar o modelo de céu cujos resultados obtidos para a Iluminância Global e Difusa obtidos a partir da integração da iluminância parcial provocada pelas diferentes direções do céu mais se aproximaram dos valores de referência utilizados para determinação dos modelos de céu.

Constatou-se que a maioria dos valores de Divergência situa-se no intervalo entre -5% e 5%, com uma Média Geral de 53,64% das ocorrências. Considerando-se o intervalo entre -25% e 25% os valores situam-se na maioria entre 70% e 80%, com uma Média Geral de 80,06% das ocorrências, o que é bastante consistente com as referências adotadas.

Quando tratou-se da avaliação anual da quantidade total de iluminância difusa modelada, os valores das diferenças percentuais situaram-se entre 5,80% em Fortaleza e 21,09% em Brasília. A diferença percentual média entre os valores destas cidades verificadas foi de 11,44%.

Constatou-se que nos ângulos solares mais próximos do Zenith (maiores valores absolutos de iluminância) os valores de conversão foram significativamente mais próximos dos valores iniciais de referência, enquanto que nos ângulos solares mais próximos do horizonte a divergência foi maior, embora incidindo sobre valores iniciais absolutos muito menores que nos casos dos ângulos solares mais elevados, o que reforçou a suposição final apresentada no tópico anterior desta conclusão quanto à magnitude aproximada de erro dos resultados.

Aqui também se constatou que a adoção do modelo analítico de predição da Luminância do Zenith a partir da relação “**Global = Difusa + Direta**” e da determinação analítica do Turvamento, conforme proposto na conceituação deste procedimento, não comprometeu os resultados além da divergência já verificada na aplicação das fórmulas de eficácia luminosa. Ou seja, os resultados obtidos a partir da aplicação do conceito mantiveram divergência significativamente abaixo de 10 % em relação aos valores iniciais de referência, em muitos casos em torno de 1% e 3%, conforme apresentaram as planilhas.

Destaca-se entretanto, que esta divergência entre o valor convertido (este com bastante precisão em relação aos dados do arquivo climático) e o valor integrado a partir do tipo de céu podem ser reduzidos a praticamente zero, já que a fórmula de distribuição de luminâncias é relativa à luminância do Zenith, aqui determinada analiticamente. Uma vez conhecida a divergência entre a integração e a conversão, é possível reajustar a luminância do Zenith segundo o fator de divergência encontrado, de forma que o resultado final fique praticamente igual ao da conversão luminosa ou aos próprios dados de luminosidade do arquivo climático, quando utilizados.

As divergências mais acentuadas ocorreram nos horários de menor luminosidade (início e fim do dia) e ocorreram porque o programa não selecionou valores mínimos a modelar, como no caso da modelagem de 1 Kwh/m² em Porto Alegre. As recomendações verificadas na bibliografia recomendam desprezar os horários de ângulo solar mais próximo do horizonte, o que deve ser adotado no refinamento do algoritmo. Constatou-se, no entanto, que tais divergências não tiveram impacto significativo na modelagem da quantidade total de luz anualizada.

De maneira geral o procedimento de determinação baseado na aproximação de resultados gerados por possíveis modelos aplicáveis a um determinado conjunto de descritores mostrou-se eficaz no sentido de selecionar o modelo que conduz a resultados mais próximos dos descritores, dando confiabilidade a esta etapa do procedimento de determinação da Estimativa Anual de Luz Natural – EALN.

6.1.3 Sobre a Consistência do Encadeamento de Cálculo na Determinação da EALN através do DLC

Nesta etapa da verificação obteve-se resultados totalmente consistentes, demonstrando que o procedimento de obtenção dos valores anuais a partir da determinação dos Daylight Coefficients – DLCs conduz aos mesmos resultados que o procedimento baseado na simulação estática e que usa os modelos normalizados no processamento.

Em nossa avaliação é validado plenamente o procedimento de encadeamento do cálculo através da utilização do DLC pré-determinado. Ou seja, o DLC determinado no algoritmo de cálculo e avaliado neste procedimento mostrou-se plenamente correto, reproduzindo fielmente o resultado obtido através do procedimento estático de cálculo já validado conforme descrito neste trabalho.

A verificação demonstrou que no encadeamento da simulação dinâmica, os parâmetros determinados pelo procedimento para a caracterização de um determinado tipo de céu registrado em um **step** específico, como latitude / longitude, data / hora, tipo de céu e luminância do Zenith, quando especificados para a rotina de simulação estática, que não usa o DLC e sim a aplicação plena da equação da Radiosidade, conduz aos mesmos resultados de iluminância final em cada vértice de análise.

Esta verificação estabeleceu, considerando-se também o conjunto das duas verificações anteriormente feitas, que o primeiro método de determinação dinâmica da EALN, através do DLC aplicado ao Modelo Vetorial Esférico, é válido de acordo com nossa hipótese inicial e pode ser usado como referência na avaliação dos dois outros métodos propostos e avaliados no trabalho.

6.2 SOBRE AS ABORDAGENS DO COEFICIENTE DE RADIOSIDADE E DA RADIOSIDADE PLENA COMO ALTERNATIVAS AO MÉTODO CLÁSSICO DO DAYLIGHT COEFFICIENT – DLC

Inicialmente consideramos 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 também em uma proposição inovadora.

Os resultados obtidos na verificação do encadeamento de cálculo através do DLC, conforme apresentada no tópico anterior 6.1.3, mostram que o método conduz aos mesmos resultados que o encadeamento de simulações estáticas que utilizam os mesmos parâmetros, através da 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. Aliás, foi esta constatação e a avaliação conceitual da proposição inicial dos Coeficientes de Radiosidade como alternativa ao DLC que induziram à proposição do método baseado na Radiosidade Plena com uma terceira alternativa para determinar a EALN que seria viável, como se demonstrou nas verificações.

Quanto aos resultados numéricos obtidos para os 3 métodos, a análise é eloquente em demonstrar que, para um mesmo modelo e uma mesma resolução, os 3 métodos conduzem ao mesmo resultado, o que se verificou em todos os 12 casos que caracterizam estas comparações: 4 Modelos com 3 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 agregam estatisticamente os valores de iluminância ao longo do ano foram enquadrados dentro da métrica.

O que demonstrou maior variabilidade foi a comparação de precisão em relação às diferentes resoluções. 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, onde um ponto ou dois podem significar diferenças entre 100 e 200 %.

6.3 SOBRE A EFICIÊNCIA E VANTAGENS DE CADA UM DOS MÉTODOS

A verificação da eficiência dos 3 métodos relacionada ao tempo de processamento demonstrou a correção da hipótese inicial com relação à relação entre número de direções do globo, número de vértices do projeto e número de horas a avaliar na simulação dinâmica.

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.

Na Tabela 35 estão sintetizados os tempos de processamento dos 4 modelos nas resoluções Baixa, Média e Alta para cada um dos 3 métodos:

Tabela 35: Tempos de processamento, em minutos 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	MÉTODO	TST0_0-1.	TST1_0-1.	TST2_0-1.	TC_1-0
		1.672 vert	2.032 vert	3.614 vert	22.918 vert
GLOBO 4 8.151 dir	DLC (min)	38	54	169	1.246
	DLC (%)	100,0	100,0	100,0	100,0
	CR (min)	17	22	75	2.616
	CR (%)	44,7	40,7	44,4	210,0
	RADTOT (min)	63	83	150	1.079
	RADTOT (%)	165,8	153,7	88,8	86,6
GLOBO 6 26.335 dir	DLC (min)	133	200	740	6.738
	DLC (%)	100,0	100,0	100,0	100,0
	CR (min)	25	36	107	3.890
	CR (%)	18,8	18,0	14,5	57,7
	RADTOT (min)	75	93	203	1.414
	RADTOT (%)	56,4	46,5	27,4	21,0
GLOBO 8 73.099 dir	DLC (min)	383	588	2.115	16.070
	DLC (%)	100,0	100,0	100,0	100,0
	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	12,0	13,4

Fonte: Autoria própria.

Aqui fazemos uma observação quanto ao fato de nenhum dos modelos em qualquer resolução ter sido processado de forma mais eficiente pelo método dos vértices pelo fato de termos

adotado como resolução baixa o globo com 8.151 direções na abóbada. Como comentamos anteriormente as resoluções menores do Globo, embora disponíveis no programa apresentam margens de erro maiores e não são atualmente mais utilizadas, não sendo realista usá-las apenas para efeito de comprovação da hipótese inicial

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.

Consideraremos os seguintes aspectos:

- a) Iluminância (E) inicial (direta e total) e final dos vértices de análise;
- b) Iluminância (E) inicial (direta e total) e final dos vértices protagonistas (opacos e transmissores difusos);
- c) Refletância dos vértices opacos difusos e refletância / transmitância dos vértices transmissores difusos;

Relembramos que, no modelo de determinação da visibilidade do MVE, a modificação da transmitância dos vidros especulares implica em nova determinação da visibilidade, em qualquer dos 3 métodos de determinação da EALN, sendo descartada nesta análise final.

As possibilidades estão apresentadas no Quadro 4:

Quadro 4: Disponibilidade de grandezas após o cálculo segundo cada um dos métodos (Iluminância indicada como E).

GRANDEZA	DLC	CR	RADTOT
E final total análise	SIM	SIM	SIM
E inicial total análise	NÃO	SIM	SIM
E inicial direta análise	NÃO	SIM	SIM
E final total protagonistas	NÃO	NÃO	SIM
E inicial total protagonistas	NÃO	SIM	SIM
E inicial direta protagonistas	NÃO	SIM	SIM
Mudança de refletância / transmitância protagonistas	NÃO	NÃO	SIM

Fonte : Autoria Própria.

Observe-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 inclusive a modificação de refletâncias das superfícies opacas difusas e refletância / transmitância de superfícies transmissoras difusas sem necessidade de recalculer a visibilidade, simplesmente determinado-se novo cálculo da EALN. Nos outros dois métodos, estas modificações manteriam a visibilidade (como no anterior), mas exigiriam a determinação novamente dos Daylight Coefficients (DLC) ou Coeficientes de Radiosidade (CR), já que estes valores estão entronizados no procedimento de determinação destes valores.

Observe-se ainda que este procedimento pode também fornecer dados importantes para estudos envolvendo o ofuscamento ao longo do ano, tendência mais atual das simulações dinâmicas baseadas em arquivos climáticos. Aqui, o método do CR apresenta uma situação intermediária, onde se conhece a iluminância inicial dos vértices protagonistas do ambiente, o que já permite uma análise mais detalhada do que o DLC, embora mais restrita que na abordagem plena.

Para finalizar, há que se considerar que os métodos foram aplicados em forma plena, sem nenhum tipo de otimização. Pode-se considerar abordagens onde pequenas iluminâncias iniciais sejam desprezadas, ou ainda hipóteses onde visibilidades entre vértices muito reduzidas também sejam descartadas, ou ainda valores de coeficientes - DLC ou CR - muito pequeno sejam também

descartados. 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 apresentam como possibilidades futuras.

Finalizamos este trabalho considerando que, pelas demonstrações e conclusões apresentadas, as hipóteses iniciais desta tese estão demonstradas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAL, G. - **GLOBAL ILLUMINATION METHODS FOR ARCHITECTURAL SCENES**. Eotvos Lorand University, Budapest, Hungary: 2003.

<http://sirkan.iit.bme.hu/~szirmay/GyorgyAntalDissertation.pdf>

APPEL, A. - *Some techniques for shading machine renderings of solids*. AFIPS Conference, 1968 Proc. 32 pp.37-45. <http://people.reed.edu/~jimfix/math385/lec01.1/Light/Appel.pdf>

ATTILA, B.; SZIRMAY-KALOS, L.; GÁBOR, S. - **Stochastic Glossy Global Illumination on the GPU**. SCCG 2005. Department of Control Engineering and Information Technology, Technical University of Budapest, 2005.

<http://sirkan.iit.bme.hu/~szirmay/gpurad5.pdf>

BEKAERT, P. - **HIERARCHICAL AND STOCHASTIC ALGORITHMS FOR RADIOSITY**. Doctor Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Dept. of Computer Science. Belgium, 1999.

BOHN, Christian-Arved - **Radiosity on Evolving Networks**. (cap. 2 e 3). IOS Press, 1 de janeiro de 2000 - 118 páginas

https://books.google.com.br/books?id=2hNy16kRE9oC&pg=PA34&dq=radiosity+coefficients&hl=pt-BR&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q=radiosity%20coefficients&f=false

BOURGEOIS, D.; REINHART, C.F.; WARD, G. - **A STANDARD DAYLIGHT COEFFICIENT MODEL FOR DYNAMIC DAYLIGHTING SIMULATIONS**. In: Building Research & Information, Volume 36, Issue 1, pages 68-82, 2008. <http://web.stanford.edu/group/narratives/classes/08-09/CEE215/ReferenceLibrary/Daylighting/A%20Standard%20Daylight%20Coefficient%20Model%20for%20Dynamic%20Daylighting%20Simulations.pdf>

CARLO, J.C. - **PROCESSAMENTO DE ARQUIVOS CLIMÁTICOS PARA SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**. Relatório: LabEEE-200504. LabEEE - UFSC, Florianópolis 2005.

CARVALHO, C.R. - **AVALIAÇÃO DO PROGRAMA APOLUX SEGUNDO PROTOCOLOS DO RELATÓRIO CIE 171:2006 REFERENTES À ILUMINAÇÃO NATURAL**. Dissertação de Mestrado: Orientador Anderson Claro. POSARQ, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2009. <http://www.tede.ufsc.br/teses/PARQ0110-D.pdf>

CHRISTAKOU, E.D.- **A Simulação Computacional da Luz Natural Aplicada ao Projeto de Arquitetura**. Dissertação de Mestrado. Orientador: Dra. Claudia Naves D. Amorim. PPG-FAU UnB: Brasília – DF 2004.

http://bdtd.bce.unb.br/tesesimplificado/tde_arquivos/18/TDE-2006-07-25T155045Z-154/Publico/evangelos_dimitrios.pdf

CIE - Commission Internationale de l'Éclairage - **ISO 15469:2003(E) CIE S 011/E:2003 Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky**. CIE Central Bureau, Vienna, 2004.

CIE - Commission Internationale de l'Éclairage – **Technical Report CIE 171:2006 – Test Cases to Assess The Accuracy of Lighting Computer Programs**. France, 2006.

COHEN, M.F.; GREENBERG, D.P. - **THE HEMI-CUBE: A RADIOSITY SOLUTION FOR COMPLEX ENVIRONMENTS**. SIGGRAPH '85 Volume 19, Number 3, 1985. Cornell University, Ithaca, N. Y. SAN FRANCISCO JULY 22-26, 1985.

<http://artis.imag.fr/~Cyril.Soler/DEA/IlluminationGlobale/Papers/p31-cohen.pdf>

COHEN, M.F.; CHEN, S.E.; WALLACE, J.R; GREENBERG, D.P. – **A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation**. ACM – Computer Graphics, v.22, n.4, August 1988, pp 75-84;

http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15462-f10/www/lec_slides/p75-cohen.pdf

CLARO, A. - **Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade Aplicado à Iluminação Natural**. Orientação de Fernando Oscar Ruttkay Pereira. Florianópolis. 1998. 178p. Tese (Pós-graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

http://www.infohab.org.br/acervos/pdf/codigo_biblio/18672/titulo/%3Cb%3EModelo%20vetorial%20esférico%20para%20radiosidade%20aplicado%20à%20iluminação%20natural%3C/b%3E

CRAWLEY, D.; HAND, J.; LAWRIE, L. – **Improving The Weather Information Available To Simulations Programs**. BS 1999 Kyoto, Japan September 13-15, 1999

Artigo Original:

http://www.ibpsa.org/proceedings/BS1999/BS99_P-03.pdf

Versão estendida em:

<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/weatherdatainformation.pdf>

CUNHA, A. - **AVALIAÇÃO DO PROGRAMA APOLUX SEGUNDO PROTOCOLOS DE MODELOS DE CÉU DO RELATÓRIO TÉCNICO CIE 171:2006**. Dissertação de Mestrado: Orientador Anderson Claro. POSARQ, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2011.

<http://www.tede.ufsc.br/teses/PARQ0145-D.pdf>

DARULA, S.; KITTLER, R. - **CIE GENERAL SKY STANDARD DEFINING LUMINANCE DISTRIBUTIONS**. Conference: Proc. Conf. eSim 2002. The Canadian conference on building energy simulation., At Montreal, Canada, 2002.

<http://mathinfo.univ-reims.fr/IMG/pdf/other2.pdf>

DAYSIM SITE: Principal. Visitado em 2015(a). <http://daysim.ning.com/page/credits>

DAYSIM SITE: Daysim_flowchart. Visitado em 2015(b).

http://web.mit.edu/SustainableDesignLab/projects/Daysim/Daysim_flowchart.html

DAYSIM SITE: DAYSIM Subprogram gen_dc – Daysim. Visitado em 2015(c).

<http://daysim.ning.com/subprogram/gencd>

DOGAN, T.; REINHART, C.; MICHALATOS, P. - **URBAN DAYLIGHT SIMULATION CALCULATING THE DAYLIT AREA OF URBAN DESIGNS**. Anais: SimBuild2012 - Fifth National Conference of IBPSA-USA, Madison, Wisconsin, August 1-3, 2012.

http://web.mit.edu/SustainableDesignLab/publications/SimBuild2012_UrbanDaylightSimulation.pdf

ENERGY DESIGN RESOURCES - **DESIGN BRIEF: Understanding Daylight Metrics**. Architectural Energy Corporation, California, USA, 2008.

http://energydesignresources.com/media/1702/EDR_DesignBriefs_daylightmetrics.pdf?tracked=true

FONTOYNONT, M.; BARRAL, P.; PEREZ, R. - **Indoor Daylighting Frequencies Computed as a Function of Outdoor Solar Radiation Data**. Proc. of 22nd International Illumination Commission (CIE) Conference, Melbourne, Australia, 1991.

<http://asrc.albany.edu/people/faculty/perez/publications/Solar%20Resource%20Assessment%20and%20Modeling/More%20Papers%20on%20Resource%20Assessment%20and%20Satellites/indoor%20daylighting-91.pdf>

GEEBELEN, B.; NEUCKERMANS, H. – **NATURAL LIGHTING DESIGN IN ARCHITECTURE: FILLING IN THE BLANKS**. Anais: *Seventh International IBPSA Conference*. P 1207-1213. Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001.

GEEBELEN, B. - **Daylighting Computation Methods - From Dot Chart to Digital Simulation**. Syllabus Studiedag Daglichttoetreding in Gebouwen, Antwerpen: KVIV, 2003.

https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/160607/1/kviv_geebelen.pdf%20-

GEEBELN, B.; NEUCKERMANS, H. - **OPTIMIZING DAYLIGHT SIMULATION FOR SPEED AND ACCURACY**. Anais: XVIII International IBPSA Conference – BS2003, pp 379 a 386. Eindhoven - Netherlands, 2003

http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive%5CIBPSA%5CUFSC901.pdf

HASTINGS, W. K. - **Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications**, *Biometrika* 57 (1), 97 (1970).

HESCHONG, L.; SAXENA, M.; HIGA, R. - **Improving Prediction of Daylighting Performance**. In: ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2010 pp.3-103 a 3-115. <http://aceee.org/files/proceedings/2010/data/papers/2012.pdf>

HESCHONG, L. et ali - **LM-83-12 - Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**. IES STANDARD, EPFL-STANDARD-196436. ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY (IES) 2013 – 14 pages. [Heschong, Lisa \(Chair\)](#); [Wymelenberg, Van Den; \(Vice-Chair\), Keven](#); [Andersen, Marilyne](#); [Digert, N.](#); [Fernandes, L.](#); [Keller, A.](#); [Loveland, J.](#); [McKay, H.](#); [Mistrick, R.](#)

INEICHEN, P.; MOLINEAUX, P. B.; PEREZ, R. - **Sky Luminance Data Validation; Comparison of 7 models with 4 Data Banks**. *Solar Energy*, 52, 4 pp. 337-34, 1994.

<http://asrc.albany.edu/people/faculty/perez/publications/Solar%20Resource%20Assessment%20and%20Modeling/More%20Papers%20on%20Resource%20Assessment%20and%20Satellites/sky%20luminance-94.pdf>

IVERSEN, A. et ali. - **Daylight calculations in practice: An investigation of the ability of nine daylight simulation programs to calculate the daylight factor in five typical rooms**. SBi 2013:26. Danish Building Research Institute, Aalborg University · 2013.

<http://www.sbi.dk/indeklima/lys/daylight-calculations-in-practice/daylight-calculations-in-practice-1>

[IVERSEN, A.](#) - Development of a simple framework to evaluate daylight conditions in urban buildings in the early stages of design. PhD Thesis. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2013.

<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBwQFjAAahUKEwjX4vyOtdflAhVBi5AKHbHICq0&url=http%3A%2F%2Fwww.byg.dtu.dk%2F%2Fmedia%2FInstitutter%2FByg%2Fpublikationer%2FPhD%2Fbyg-r256.ashx%3Fla%3Dda&usq=AFQjCNFjPwJKuRh70pUDWDGMOx7VG1AbtA&bvm=bv.105814755,bs.1,d.Y2l>

JAKUBIEK, J.A.; REINHART, C.F. - **Overview and Introduction to DAYSIM and Current Research Developments**. Massachusetts Institute of Technology, Building Technology Program 12, 2012.

http://www.radiance-online.org/community/workshops/2012-copenhagen/Day1/Jakubiec/jakubiec.reinhart_radiance-workshop-presentation_daysim.pdf

JONES, N.; REINHART, C. - **Physically Based Global Illumination Calculation Using Graphics Hardware**. *Proceedings of eSim 2014: The Canadian Conference on Building Simulation*, 474-487, 2014.

<http://www.ibpsa.org/proceedings/eSimPapers/2014/4B.3.pdf>

JONES, N.; REINHART, C. - **Accelerad-Daylight Simulation for Architectural Spaces Using GPU Ray Tracing**. Presentation: GPU Technology Conference 2015, San Jose, California, USA.

http://on-demand.gputechconf.com/gtc/2015/presentation/S5416_Nathaniel-Jones.pdf

KITTLER, R.; PEREZ, R.; DARULA, S. - **A NEW GENERATION OF SKY STANDARDS**. Proc. Conf. LUX EUROPA – 1997 pp. 359-373.

http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=16&cad=rja&uact=8&ved=0CEIQFjAFOAo&url=http%3A%2F%2Fskydoc.googlecode.com%2Fsvn%2Ftrunk%2FReference%2FKittler%2520-%2520A%2520New%2520Generation%2520of%2520Sky%2520Standards.pdf&ei=LPNbVbDBIoiqggTAiIKIDQ&usq=AFQjCNFFtrxCYue-jbFXQXGjvYQ_UquA3A&bvm=bv.93756505,d.eXY

KITTLER, R.; DARULA, S. - **Determination of Sky Types From Global Illuminance**. Lighting Research Technology, 32(4) pp.187-193 (2000).

KITTLER, R. et ali. - **Guidelines For More Realistic Daylight Exterior Conditions In Energy Conscious Designs: Computer Adaptation And Examples**. SK - GR 013/1998. Bratislava, Athens 2000.
http://www.efe.gr/wp-content/uploads/2011/06/GUIDSKGR_V97.pdf

LUTRON - **Daylight Autonomy: made possible by Lutron**. Technical Document. site 2015.
http://www.lutron.com/TechnicalDocumentLibrary/Daylight_Ana_Bklt.pdf

MARDALJEVIC, J. - **Examples of Climate-Based Daylight Modelling**. CIBSE National Conference 2006: Engineering the Future, 21-22 March 2006, Oval Cricket Ground, London, UK.

MARDALJEVIC, J. - **Climate-Based Modelling and Daylight Coefficients**. 5th International Radiance Scientific Workshop, 13-14 September 2006. IESD, De Montfort University, Leicester, UK.
<http://www.radiance-online.org/community/workshops/2006-leicester/Presentations/MardaljevicCBnDCs.pdf>

MARDALJEVIC, J. - **Daylighting in Buildings: New Modelling + New Metrics + New Materials = New Challenges**. Palestra: XII Encontro Nacional e VIII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC e ELACAC 2013). Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído – ANTAC. UNB, Brasília – DF, 2013

MORAES, L.N.; PEREIRA, F.O.R. - **UM MÉTODO SIMPLIFICADO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO DA ILUMINAÇÃO NATURAL**. Anais: XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC e ELACAC 2011). Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído – ANTAC. Buzios, RJ, 2011.
<https://encacrio2011.files.wordpress.com/2011/08/topico6artigo24.pdf>

MORAES, L.N.; SOBREIRA, A.; CLARO, A. - **Evaluation of the Software Lightool and Apolux According to Protocols of Technical Report CIE 171:2006**. Proceedings of BS2013, pp 1079 a 1086. 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. Chambéry, France, august 26-28 2013.
http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_2173.pdf

OLIVEIRA FILHO, J.C. - **ESTUDO DA RADIOSIDADE COM APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTOCÁSTICOS E TESTE NUM PROBLEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA**. Dissertação Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Orientador: Prof. Dr. Sergio Scheer. Curitiba, 2005.
<http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Pesquisa/Estudo%20da%20radiosidade%20com%20aplicacao%20de%20metodos%20estocasticos.pdf>

PEREIRA, R.C. - **“Metodologia para Validação de Ferramentas de Cálculo de Iluminação Natural em Edificações”**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - UFSC. (Orientador : Fernando Oscar Ruttkay, Co-Orientador Anderson Claro).

PEREIRA, R.C.; PEREIRA, F.O.R.; CLARO, A. - **AVALIAÇÃO DO SIMULADOR COMPUTACIONAL APOLUX ATRAVÉS DO EMPREGO DE MAPEAMENTO DIGITAL DE LUMINÂNCIAS**. XI ENCAC – Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; VII ELACAC Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Buzios – RJ, Brasil, 2011.
<http://www.ctec.ufal.br/grupopesquisa/grilu/Artigos/Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20Simulador%20Computacional%20Apolux%20atrav%C3%A9s%20do%20Emprego%20de%20Mapeamento%20Digital%20de%20Lumin%C3%A2ncias.pdf>

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART, J. - **Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance**. Solar Energy Vol. 44, pp. 271-289, 1990.

<http://asrc.albany.edu/people/faculty/perez/publications/Solar%20Resource%20Assessment%20and%20Modeling/More%20Papers%20on%20Resource%20Assessment%20and%20Satellites/modeling%20daylight-90.pdf>

PEREZ, R.; SEALS,R.;MICHALSKY,J. – **All-Weather Model For Sky Luminance Distribution – Preliminary Configuration And Validation**. Solar Energy, Vol. 50, n. 3, pp.235-245. U.S.A, 1993.
<http://freepaper.me/download/PDF/10.1016-0038-092X%2893%2990017-I.PDF?hash=DOSuHpl9dGvbxvqAqrGwUw>

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. - (1993): **Erratum to All-Weather Model for Sky Luminance Distribution**. Solar Energy 51, 5, pp. 423.
<http://asrc.albany.edu/people/faculty/perez/publications/Solar%20Resource%20Assessment%20and%20Modeling/More%20Papers%20on%20Resource%20Assessment%20and%20Satellites/erratum-93.pdf>

PINTO, Jeanne Moro Moreira. **Avaliação da eficiência energética nos sistemas de iluminação do Tribunal de Contas do Paraná**. 2014. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/963/1/CT_PPGEC_M_Pinto%2c%20Jeanne%20Moro%20Moreira_2014.pdf

REINHART, C.F.; HERKEL, S. – **The simulation of anual daylight illuminance distributions – a state-of-art comparision of six RADIANCE-based methods**. In: Energy and Building v 32, p.167-187, 2000.

REINHART, C.F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. - **Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design**. In:Leukos v.3 n.1, july 2006, pp 7–31.
<http://isites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic256760.files/DynamicDaylightPerformanceMetricsInLeukos.pdf>

REINHART, C. - **MIT OpenCourseWare: 4.430 Daylighting Simulation**. Massachusetts Institute of Technology, Department of Architecture, Building Technology Program. Spring 2012.
http://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-430-daylighting-spring-2012/lecture-notes/MIT4_430S12_lec09.pdf

RORIZ, M. - **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, SP. Janeiro de 2012.
http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/sobre_epw.pdf

RORIZ, M. - **Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, SP. Novembro de 2012.
http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/correcao_epw_antac.pdf

ROUDSARI, M.S.; YI, Y.; DREW, C.R. - **APPLYING CLIMATE-BASED DAYLIGHT MODELING (CBDM) FOR A MACRO SCALE MASTER PLAN DESIGN CASE STUDY: THE GREAT CITY IN CHINA**.1st Asia conference of International Building Performance Simulation Association, 2012. <http://www.ibpsa.org/proceedings/asim2012/0097.pdf>

SOUZA, M. B.- **Potencialidade de Economia de Energia Elétrica Gasta em Iluminação Com Aproveitamento da Luz Natural Através da Utilização de Sistemas Automáticos de Controle**, Tese de Doutorado. Or. Fernando O. R. Pereira,(Engenharia de Produção) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC,2003

SPENCER, S. - Radiosity OverView Part 2. SIGGRAPH 1993 Education Slide Set.
https://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/radiosity/overview_2.htm

SPOT PRO V.5: site do software. Visitado em agosto 2015.
<http://www.manula.com/manuals/zrogers/spot-pro-v-5/1/en/topic/1-2-general-spot-notes>

SZÉCSI, L.; SZIRMAY-KALOS, L.; SBERT, M. - **Interactive Global Illumination with Precomputed Radiance Maps**. In: Wolfgang Engel (ed). ShaderX 6. Charles River Media, pp. 401-410. 2008. <http://sirkan.iit.bme.hu/~szirmay/precompShaderX.pdf>

SZIRMAY-KALOS, L. - **Theory of Three Dimensional Computer Graphics Department of Control Engineering and Information Technology**. Budapest: Akademiai Kiado, 1996
<http://sirkan.iit.bme.hu/~szirmay/book.html>
<http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/125399/fa18f48cab5c056f05420eed8169993.pdf?sequence=1>

SZIRMAY-KALOS, L. - **MONTE-CARLO METHODS IN GLOBAL ILLUMINATION**. Institute of Computer Graphics, Vienna University of Technology. in WS of 1999/2000. <http://sirkan.iit.bme.hu/~szirmay/script.pdf>

TREGENZA, P.R.; WATERS, I. - **Daylight coefficients**. *Lighting Research and Technology* June 1983 15: 65-71,

TREGENZA,P.R. - **The Monte Carlo method in lighting calculations** *Lighting Research and Technology* December 1983 (B) 15: 163-170,

U.S. NATIONAL ARCHIVES - **CONSERVATION WORKING GUIDELINES¹ FOR LIGHT EXPOSURE IN EXHIBITIONS AND LOANS** . National Park Service, U.S. Department of Interior. S/ data, visitado em agosto 2015. <http://www.nps.gov/hfc/pdf/ex-cons/final-nara.pdf>

WARD, G.J. – **The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System**. Computer Graphics: Proceedings of SIGGRAPH' 94 Conference, 1994, pp 459-72.
<http://radsite.lbl.gov/radiance/papers/sg94.1/>

WARD, G.; SHAKESPEARE, R.A.; MARDALJEVIC, J.; EHRLICH, C. - **Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization**. Morgan Kaufmann Publishers, 1998. ISBN 0-9745381-0-8 replaces the now out-of-print first edition ISBN 1-55860-499-5.
<http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/s98c33.pdf>

WELLE, B. - Daylighting Modeling and Analysis. Presentation: CEE 111 / 211 Multidisciplinary Modeling and Anaysis, Civil & Environmental Engineering, Stanford, 2009.
<http://web.stanford.edu/class/cee111/Daylighting.pdf>

WHITTED, T. - **An Improved Illumination Model for Shaded Display Graphics and Image Processing**. Communications of the ACM, v.23 n.6. Bell Laboratories Holmdel, New Jersey: J.D. Foley Editor 1980.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.156.1534&rep=rep1&type=pdf>

ANEXO A

GRÁFICOS DE CONVERSÃO GRANDEZAS LUMINOSAS

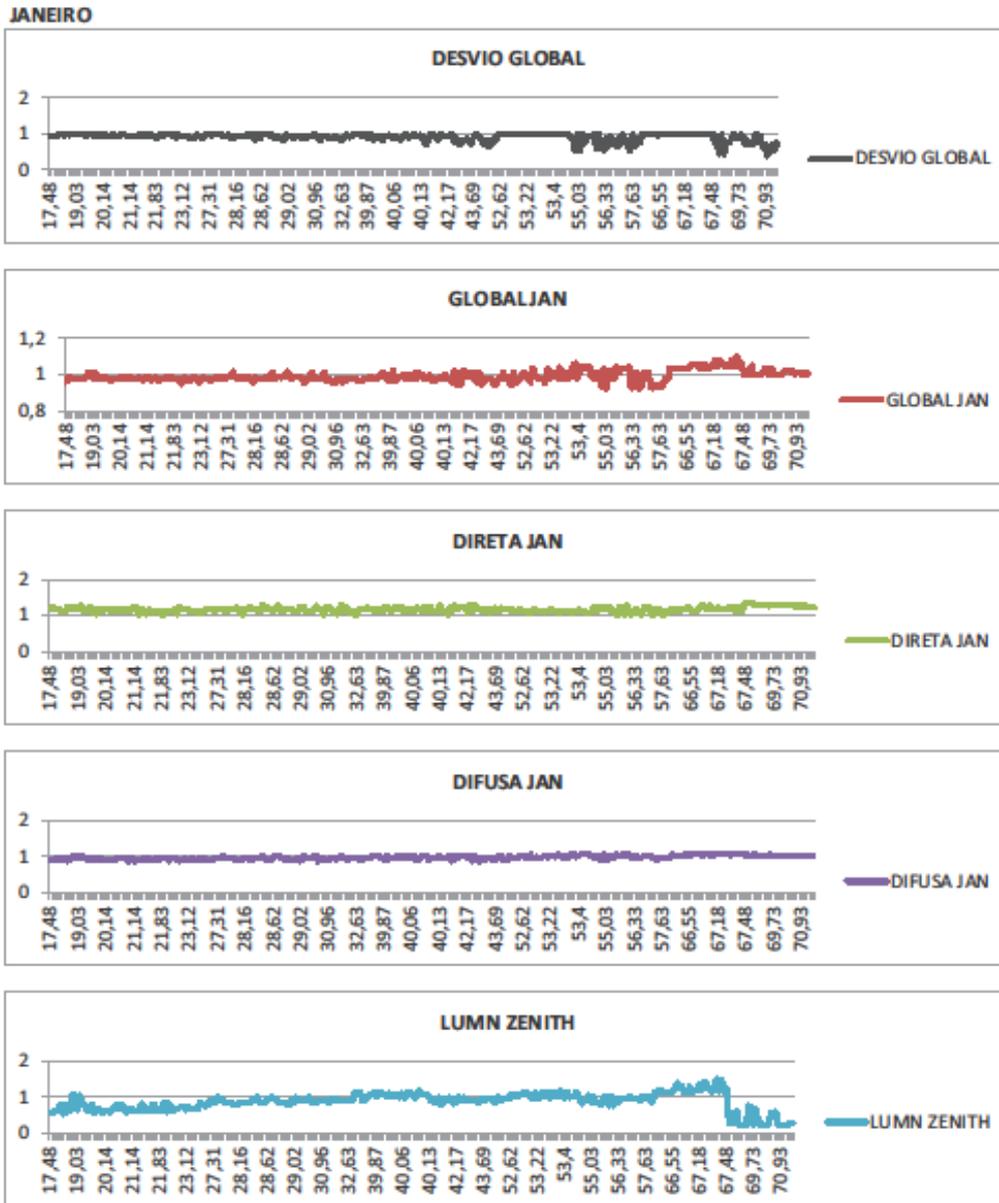
(03) AVALIAÇÃO GRÁFICA DOS DADOS DE ILUMINAÇÃO

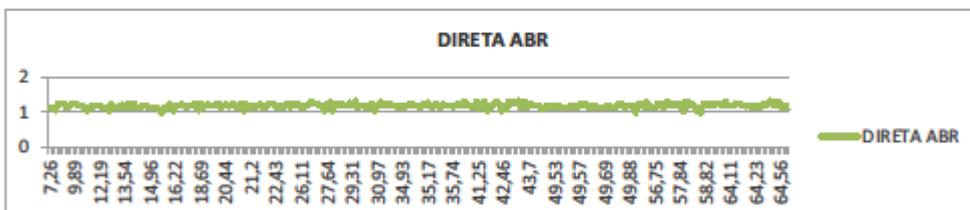
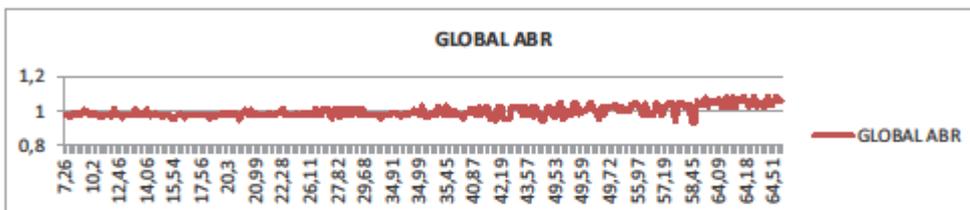
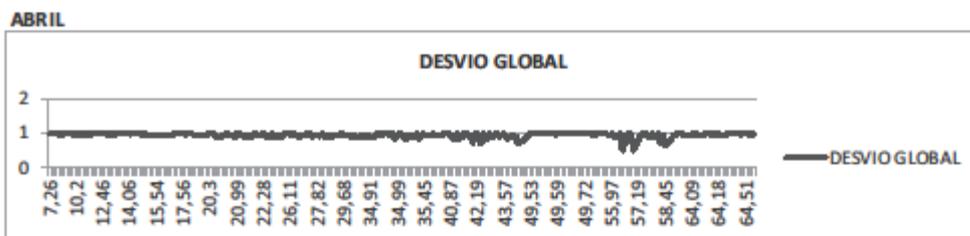
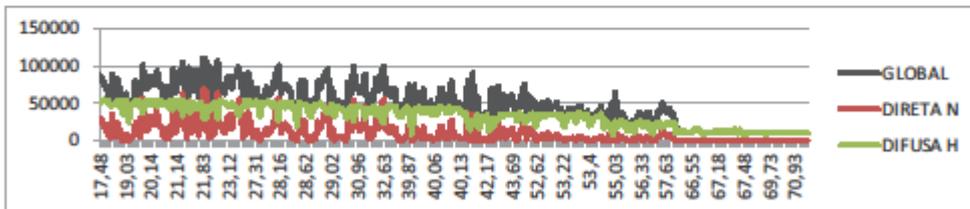
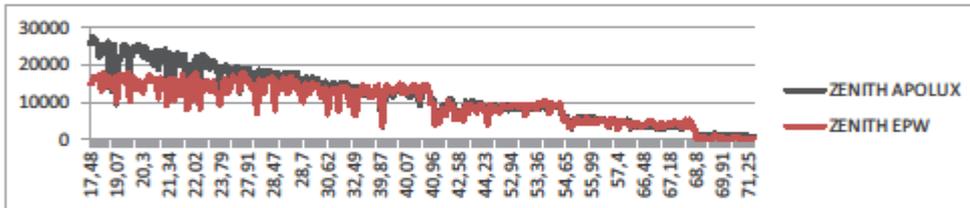
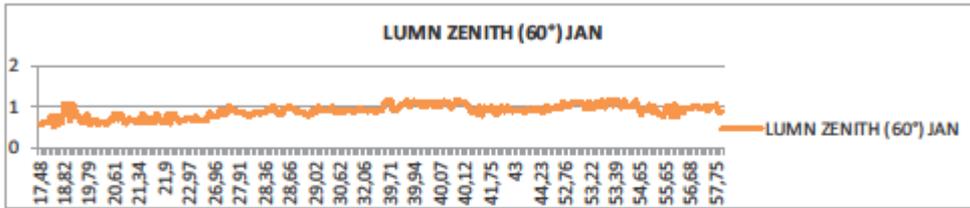
PROCEDIMENTO

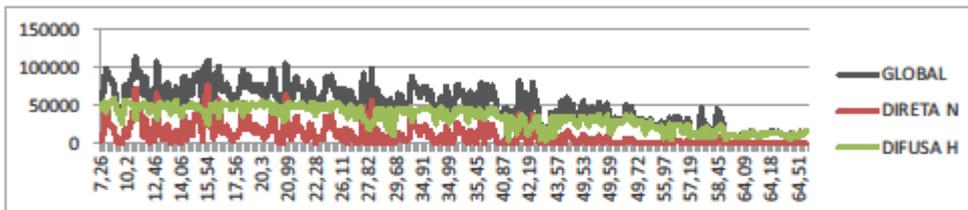
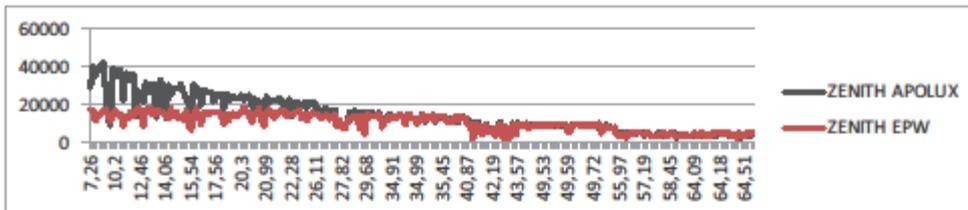
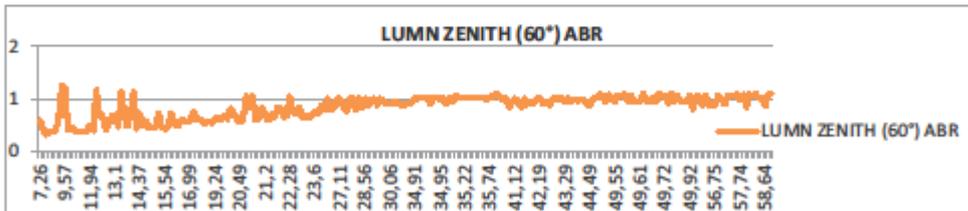
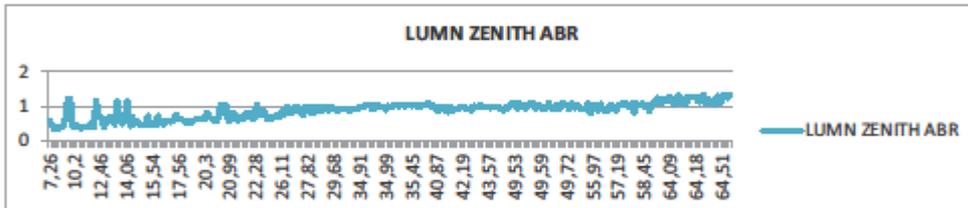
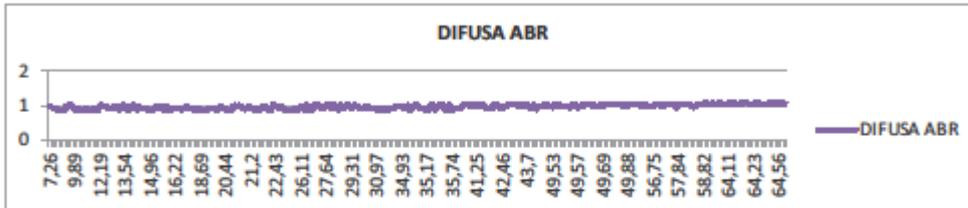
Partindo de planilhas geradas na conversão do Apolux (utilizando amostras de cidades brasileiras em arquivos do LABEEE e do Energy Plus e amostras de cidades de outros países em arquivos do Energy Plus) as linhas que continham dados numéricos foram copiadas para uma segunda planilha (DADOS). Analisando as colunas "AD" e "O" retirou-se as linhas com valores correspondentes a 0 (Zero) e com erros (DIV#0). Após isso, os dados de cada mês analisado (Janeiro, Abril, Julho e Outubro) foram separados, ainda, em planilhas diferentes para gerar os seguintes gráficos:

- **DESVIO GLOBAL:** Análise do desvio global em função altura solar. Dados resultantes da fórmula de desvio global $[N1+M1* \cos((1*PI()/180))]/L1$ aplicada na coluna "O" em função da coluna "I" (SOL.ANGZNT).
- **GLOBAL:** Análise da razão decimal entre a Iluminância global do EPW e do Apolux em função da altura solar. Dados da coluna "AA" (DivIGlb) em função da coluna "I" (SOL.ANGZNT).
- **DIRETA:** Análise da razão decimal entre a Iluminância direta normal do EPW e a do Apolux em função da altura solar. Dados da coluna "AB" (DivDirNorm) em função da coluna "I" (SOL.ANGZNT).
- **DIFUSA:** Análise da razão decimal entre a Iluminância difusa horizontal do EPW e a do Apolux em função da altura solar. Dados da coluna "AC" (DivDifHor) em função da coluna "I" (SOL.ANGZNT).
- **LUMN ZENITH:** Análise da razão decimal entre a luminância do Zenith do EPW e a do Apolux em função da altura solar. Dados da coluna "AD" (DivLumZenit-Perez) em função da coluna "I" (SOL.ANGZNT).
- **LUMN ZENITH (60°):** Análise da razão decimal entre a luminância do Zenith do EPW e a do Apolux em função da altura solar considerando o intervalo de 0° à 60°. Dados da coluna "AD" (DivLumZenit-Perez) em função da coluna "I" (SOL.ANGZNT).
- **ZENITH APOLUX + ZENITH EPW:** Comparação entre os dados de Luminância do Zenith do Apolux e do EPW em função da altura solar. Dados da coluna "V" (LumZenit-Perez) e "Z" (LumZenit-EPW)em função da coluna I (SOL.ANGZNT).
- **GLOBAL + DIRETA N + DIFUSA H:** Comparação entre os dados do arquivo climático de iluminância global, iluminância direta normal e iluminância difusa horizontal em função da altura solar. Dados da coluna "S" (IGlb), "T" (IDirNorm) e "U" (IDifHor) em função da coluna I (SOL.ANGZNT).

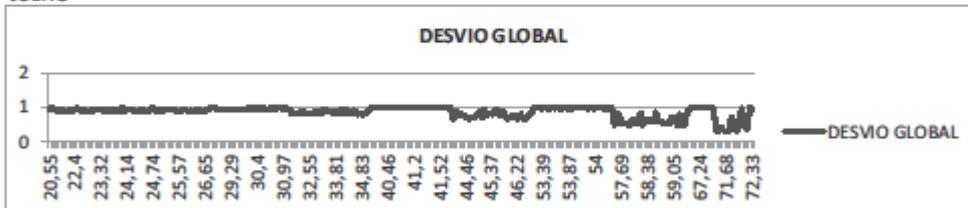
BELÉM

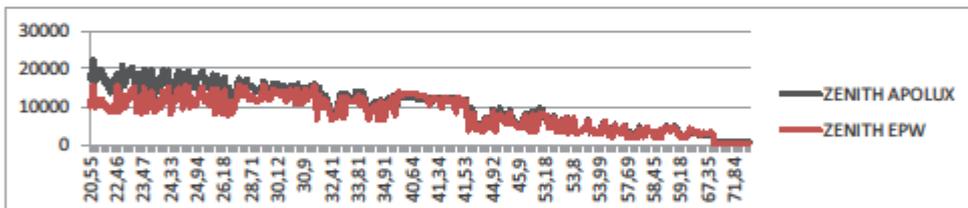
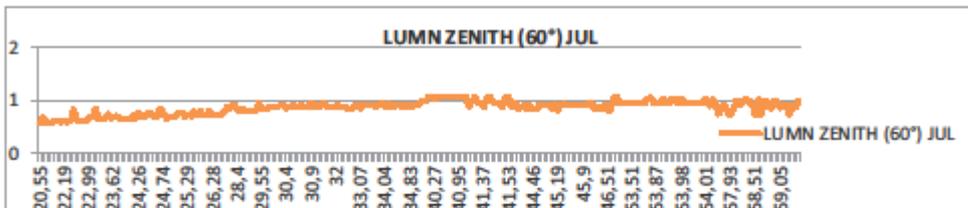
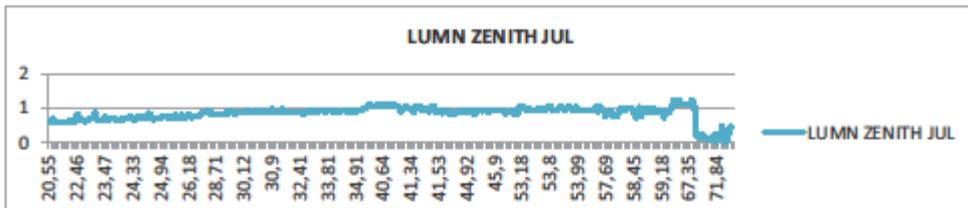
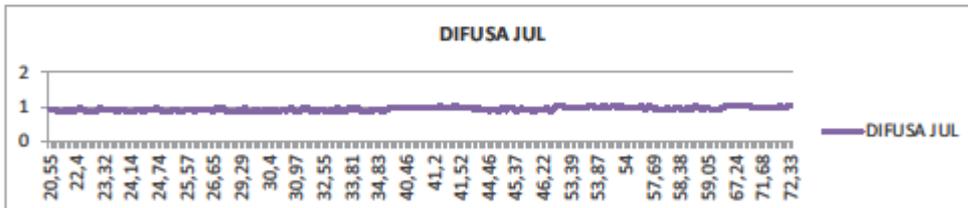
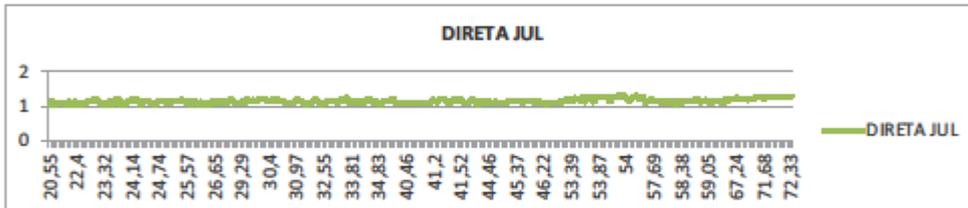
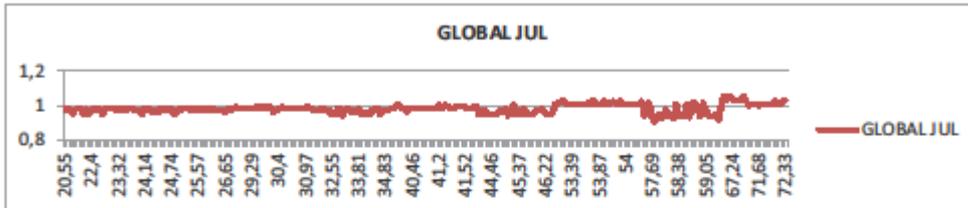


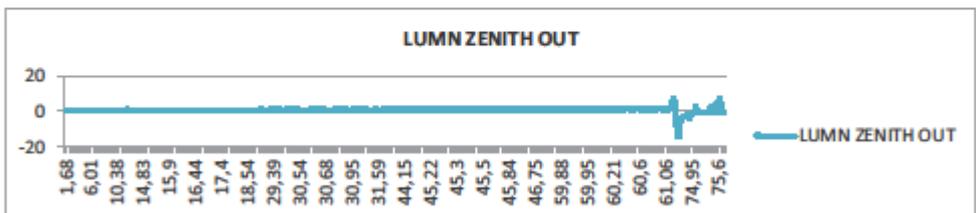
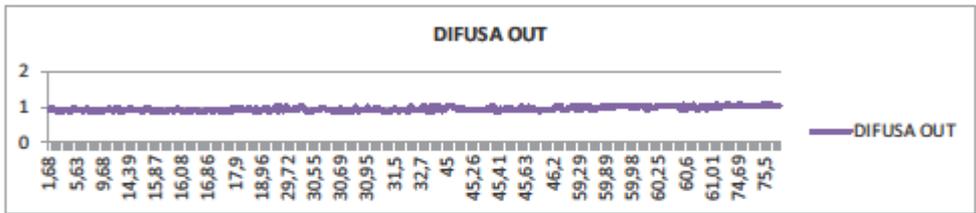
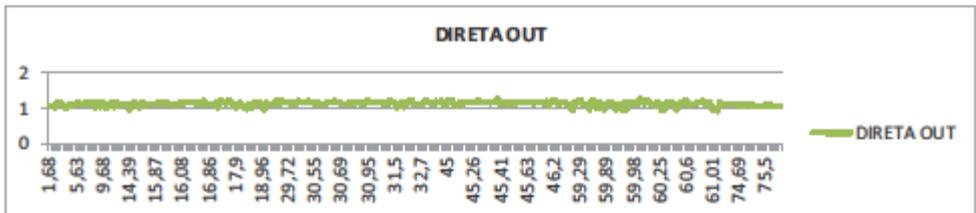
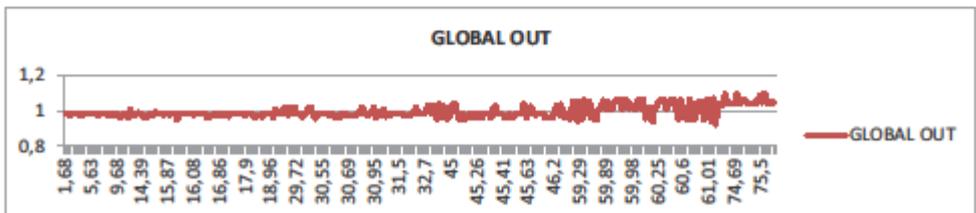
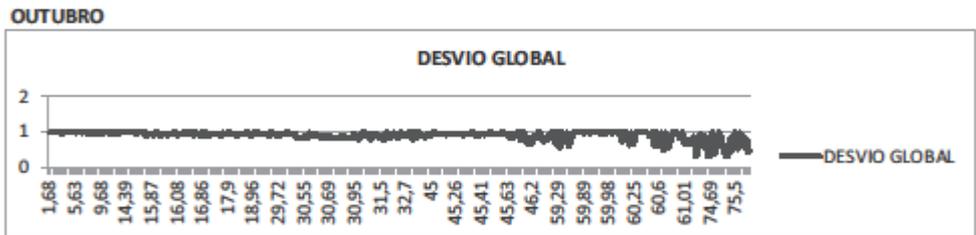
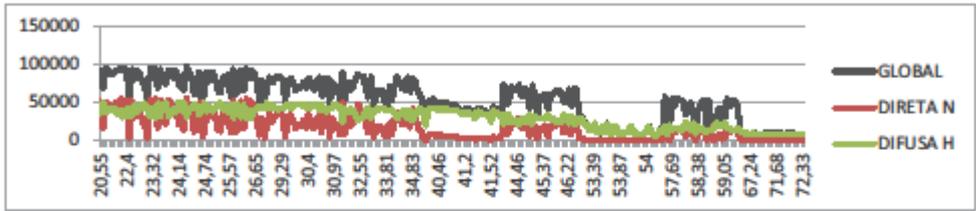


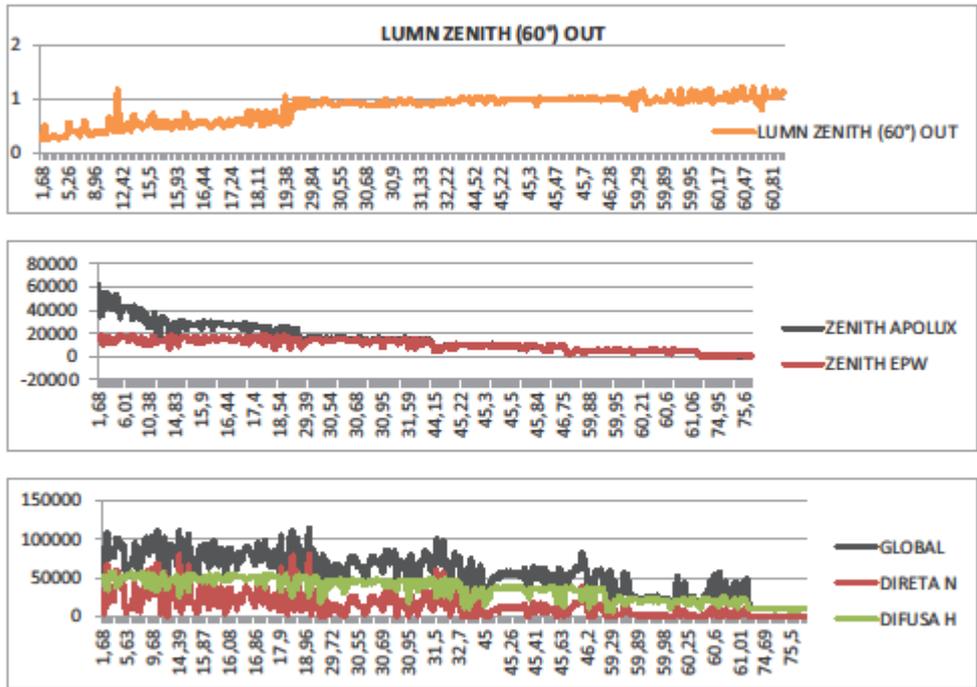


JULHO

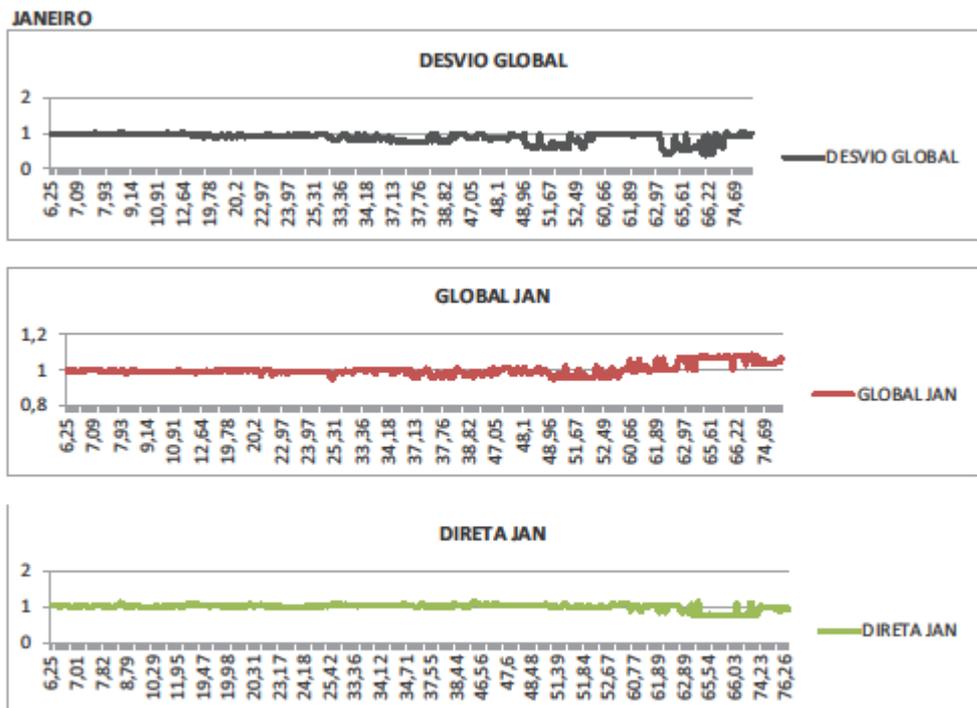








BRASÍLIA



ANEXO B

TABELA DE INTERVALO DOS DESCRITORES DOS TIPOS DE CÉU

DE -> razão D/E ; DT -> Brilho Delta ; TV -> Turvamento

// tipo I.1

dsceu[0].DEmi = 0.02;
dsceu[0].DEmd = 0.20; // geralmente até 0.25
dsceu[0].DEmx = 0.40; // raramente entre 0.25 e 0.4
dsceu[0].DTmi = 0.001; // limite inferior
dsceu[0].DTmd = 0.09;
dsceu[0].DTmx = 0.18; // geralmente menor que
dsceu[0].TVmi = 20; // raramene entre 20 e 40
dsceu[0].TVmd = 45;
dsceu[0].TVmx = 100; // valor hipotético para limite

// tipo I.2

dsceu[1].DEmi = 0.2;
dsceu[1].DEmd = 0.3; // geralmente entre 0.2 e 0.4
dsceu[1].DEmx = 0.6; // raramente maior que 0.4
dsceu[1].DTmi = 0.18; // minimo
dsceu[1].DTmd = 0.24; // med. interpolada
dsceu[1].DTmx = 0.30; // maximo
dsceu[1].TVmi = 15; // acima de 15
dsceu[1].TVmd = 20; // media hipotetica prov
dsceu[1].TVmx = 70; // limite hipotetico do descrit anterior prov

// tipo II.1

dsceu[2].DEmi = 0.2; // inf
dsceu[2].DEmd = 0.35; // geralmente mais brilhante
dsceu[2].DEmx = 0.4; // sup
dsceu[2].DTmi = 0.12; // inf
dsceu[2].DTmd = 0.21; // media prov
dsceu[2].DTmx = 0.3; // sup
dsceu[2].TVmi = 18; // inf prov
dsceu[2].TVmd = 20; // usualmente em torno de 20
dsceu[2].TVmx = 22; // sup prov

// tipo II.2

dsceu[3].DEmi = 0.3; // inf
dsceu[3].DEmd = 0.45; // usualmente mais brilhante
dsceu[3].DEmx = 0.6; // sup
dsceu[3].DTmi = 0.25; // inf
dsceu[3].DTmd = 0.375; // med. prov
dsceu[3].DTmx = 0.5; // sup
dsceu[3].TVmi = 18; // inf prov
dsceu[3].TVmd = 20; // geralmente em torno de 20
dsceu[3].TVmx = 22; // sup prov

// tipo III.1

dsceu[4].DEmi = 0.32; // inf prov
dsceu[4].DEmd = 0.35; // geralemnte em torno de 0.35
dsceu[4].DEmx = 0.37;
dsceu[4].DTmi = 0.2; // inf
dsceu[4].DTmd = 0.25; // med prov.
dsceu[4].DTmx = 0.3; // sup

dsceu[4].TVmi = 18; // inf prov
dsceu[4].TVmd = 20; // geralmente em torno de 20
dsceu[4].TVmx = 22; // sup prov

// tipo III.2

dsceu[5].DEmi = 0.30; // geralmente maior que 0.3
dsceu[5].DEmd = 0.40; // med prov
dsceu[5].DEmx = 0.45; // limite hipotético frente ao próximo
dsceu[5].DTmi = 0.25; // inf
dsceu[5].DTmd = 0.375; // med prov
dsceu[5].DTmx = 0.50; // sup
dsceu[5].TVmi = 12; // inf prov
dsceu[5].TVmd = 15; // geralmente em torno de 15
dsceu[5].TVmx = 18; // sup prov

// tipo III.3

dsceu[6].DEmi = 0.40; // inf
dsceu[6].DEmd = 0.50; // med prov
dsceu[6].DEmx = 0.60; // sup
dsceu[6].DTmi = 0.35; // maior que 0.35
dsceu[6].DTmd = 0.5; // med prov
dsceu[6].DTmx = 0.60; // sup prov
dsceu[6].TVmi = 8; // inf prov
dsceu[6].TVmd = 10; // geralmente em torno de 10
dsceu[6].TVmx = 12; // sup prov.

// tipo III.4

dsceu[7].DEmi = 0.3; // usualmente acima de 0.3
dsceu[7].DEmd = 0.45; // med prov
dsceu[7].DEmx = 0.6; // sup prov
dsceu[7].DTmi = 0.25; // maior que 0.25
dsceu[7].DTmd = .50; // // med prov alta
dsceu[7].DTmx = 1.0; // limite para maior
dsceu[7].TVmi = 6; // inf
dsceu[7].TVmd = 10; // med prov
dsceu[7].TVmx = 15; // sup
dsceu[7].LDmi = 0.21; // inf
dsceu[7].LDmd = 0.23; // med prov
dsceu[7].LDmx = 0.26; // sup
dsceu[7].ct = 0;
dsceu[7].st = ON;

// tipo IV.2

dsceu[8].DEmi = 0.3; // geralmente maior que 0.3
dsceu[8].DEmd = 0.6; // med prov
dsceu[8].DEmx = 1.0; // sup prov
dsceu[8].DTmi = 0.25; // maior que 0.25
dsceu[8].DTmd = 100; // // med prov alta
dsceu[8].DTmx = 200; // limite para maior
dsceu[8].TVmi = 15; // geral/e acima de 15
dsceu[8].TVmd = 16; // med prov
dsceu[8].TVmx = 20; // sup prov

// tipo IV.3

dsceu[9].DEmi = 0.3; // inf

dsceu[9].DEmd = 0.4; // med prov
dsceu[9].DEmx = 0.5; // sup
dsceu[9].DTmi = 0.25; // inf
dsceu[9].DTmd = 0.34; // med prov
dsceu[9].DTmx = 0.43; //sup
dsceu[9].TVmi = 6; // inf
dsceu[9].TVmd = 9; // med prov
dsceu[9].TVmx = 12; // sup

// tipo IV.4

dsceu[10].DEmi = 0.1; // inf
dsceu[10].DEmd = 0.25; // med prov
dsceu[10].DEmx = 0.4; // sup
dsceu[10].DTmi = 0.06; // inf
dsceu[10].DTmd = 0.19; // med prov
dsceu[10].DTmx = 0.32; // sup
dsceu[10].TVmi = 0.1; // inf
dsceu[10].TVmd = 1.5; // med prov
dsceu[10].TVmx = 4.0; // sup

// tipo V.4

dsceu[11].DEmi = 0.08; // inf
dsceu[11].DEmd = 0.14; // med prov
dsceu[11].DEmx = 0.20; // sup
dsceu[11].DTmi = 0.05; // inf
dsceu[11].DTmd = 0.085; // med prov
dsceu[11].DTmx = 0.12; // sup
dsceu[11].TVmi = 0.1; // inf
dsceu[11].TVmd = 1.5; // med prov
dsceu[11].TVmx = 4.0; // sup

// tipo V.5

dsceu[12].DEmi = 0.15; // inf
dsceu[12].DEmd = 0.30; // med prov
dsceu[12].DEmx = 0.45; // sup
dsceu[12].DTmi = 0.10; //inf
dsceu[12].DTmd = 0.235; //med prov
dsceu[12].DTmx = 0.37; // sup
dsceu[12].TVmi = 3.0; // inf
dsceu[12].TVmd = 5.5; // med prov
dsceu[12].TVmx = 8.0; // sup

// tipo VI.5

dsceu[13].DEmi = 0.15; // inf
dsceu[13].DEmd = 0.30; // med prov
dsceu[13].DEmx = 0.50; // sup
dsceu[13].DTmi = 0.10; // inf
dsceu[13].DTmd = 0.265; // med prov
dsceu[13].DTmx = 0.43; // sup
dsceu[13].TVmi = 4.0; // inf
dsceu[13].TVmd = 7.0; // med prov
dsceu[13].TVmx = 10; // sup

// tipo VI.6

dsceu[14].DEmi = 0.20; // inf

```
dsceu[14].DEmd = 0.40; // med prov
dsceu[14].DEmx = 0.60; // sup
dsceu[14].DTmi = 0.12; // inf
dsceu[14].DTmd = 0.335; // med prov
dsceu[14].DTmx = 0.55; // sup
dsceu[14].TVmi = 6.0; // inf
dsceu[14].TVmd = 9.0; // med prov
dsceu[14].TVmx = 12.0; // sup
```

ANEXO C

Relação das Pastas do DVD anexo, com seus conteúdos.
O DVD também inclui a versão digital da Tese.

1 – CONVERSÃO DOS DADOS DE RADIAÇÃO

Planilhas referentes ao Tópico 5.1 do Capítulo 5: VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DAS CONVERSÕES DE RADIAÇÃO EM ILUMINAÇÃO.

2 - SELEÇÃO TIPOS DE CÉU

Planilhas referentes ao Tópico 5.2 do Capítulo 5: VERIFICAÇÃO DO ALGORITMO DE INTERPRETAÇÃO DOS DADOS LUMINOSOS E SELEÇÃO DO TIPO DE CÉU

3 – VERIFICAÇÃO DINÂMICA X ESTÁTICA

Planilhas comparando resultados da simulação dinâmica com os mesmos dados em simulações estáticas, referentes ao Tópico 5.3 do Capítulo 5: VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DO ENCADEAMENTO DE CÁLCULO NA DETERMINAÇÃO DA EALN ATRAVÉS DO DLC.

4 – VERIFICAÇÃO EALN

Planilhas comparando resultados da determinação da EALN segundo 3 Métodos para os 4 Modelos e 3 Resoluções de Visibilidade, referentes ao Tópico 5.4 do Capítulo 5: VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA DE RESULTADOS DE CÁLCULOS DA EALN ATRAVÉS DOS TRÊS DIFERENTES CONCEITOS.