

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO
DOUTORADO CIDADES

PEDRO VITOR SOUSA RIBEIRO

**A MALHA DE PONTOS DE SIMULAÇÃO E O CÁLCULO DAS MÉTRICAS DE
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA LUZ NATURAL: ESTUDO E PROPOSTA DE
DISTRIBUIÇÕES NÃO UNIFORMES**

Maceió

2020

PEDRO VITOR SOUSA RIBEIRO

**A MALHA DE PONTOS DE SIMULAÇÃO E O CÁLCULO DAS MÉTRICAS DE
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA LUZ NATURAL: ESTUDO E PROPOSTA DE
DISTRIBUIÇÕES NÃO UNIFORMES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação Dinâmicas do Espaço Habitado, Doutorado Cidades, da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do grau de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carvalho Cabús

Maceió

2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

R484m Ribeiro, Pedro Vitor Sousa.

A malha de pontos de simulação e o cálculo das métricas de avaliação de desempenho da luz natural: estudo e proposta de distribuições não uniformes / Pedro Vitor Sousa Ribeiro. – 2020.

265 f. : il., figs., grafs. e tabs. color.

Orientador: Ricardo Carvalho Cabús.

Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação Dinâmicas do Espaço Habitado. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 180-199.

Apêndices: f. 200-265.

1. Iluminação natural. 2. Iluminação de ambientes. 3. Desempenho da luz natural. 4. Malha de pontos. 5. Métricas de desempenho. 6. Simulação computacional. I. Título.

CDU: 72: 628.92

Folha de Aprovação

AUTOR: PEDRO VÍTOR SOUSA RIBEIRO

(A Malha de Pontos de Simulação e o Cálculo das Métricas de Avaliação do Desempenho da Luz Natural: Estudo e Proposta de Distribuições Não Uniformes / Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas como requisito final para obtenção do grau de Doutor em Arquitetura e Urbanismo)

Aprovada em 18/12/2020



(Prof. Dr. RICARDO CARVALHO CABÚS, Universidade Federal de Alagoas)

Banca Examinadora:



(Prof^a. Dr^a. JULIANA OLIVEIRA BATISTA, Universidade Federal de Alagoas)



(Prof. Dr. RICARDO VICTOR RODRIGUES BARBOSA, Universidade Federal de Alagoas)



(Prof. Dr. EDUARDO LEITE KRÜGER, Universidade Federal Tecnológica do Paraná)



(Prof. Dr. VICTOR FIGUEIREDO RORIZ, Universidade de São Paulo)

Ao Sagrado Coração de Jesus
Ao Imaculado Coração de Maria

AGRADECIMENTOS

Essa tese completa um ciclo de 13 anos como aluno da UFAL e é difícil distingui-la de tudo aquilo que me trouxe até aqui. Nosso Senhor quis que assim fosse e a Ele vai o meu primeiro e maior agradecimento. Aos meus pais me ajudaram e me incentivaram para que eu conseguisse chegar até aqui vai meu segundo agradecimento. À minha irmã Julia, que por vezes dividiu as angústias e os sucessos da UFAL comigo também vai meu agradecimento. A minha namorada Carolina, por sua ajuda e por seu carinho sempre constante.

Como discente várias pessoas foram importantes, mas devo destaque ao Prof. Ricardo Cabús, que posso chamar também de amigo e que ao longo dos últimos oito anos me deu as oportunidades para crescer e me corrigiu quando necessário. É a pessoa a qual eu guardo a grande admiração. Aos colegas do GRILU, principalmente à Lidiane, pelo constante incentivo.

Aos amigos que pude ter ao longo desse período, especialmente à Danielle e a Milena, que entraram comigo no doutorado e que sempre me ajudaram.

Ao Prof. Rubens Duarte, que me ajudou a dar os primeiros passos na arquitetura também registro minha gratidão.

À Universidade Federal de Alagoas, que me acolheu e me ensinou muitas coisas, me deu muitas oportunidades e me proporcionou boas experiências e ao CNPq pela bolsa em diversas etapas desse processo.

*²Os céus proclamam a glória do Senhor,
e o firmamento, a obra de suas mãos;*

[...]

*⁶Armou no alto uma tenda para o sol;
ele desponta no céu e se levanta*

*⁷De um extremo do céu põe-se a correr
e vai traçando o seu rastro luminoso,
até que possa chegar ao outro extremo,
e nada pode fugir ao seu calor*

[Sl 18(19), 2,6-7]

RESUMO

O estudo do comportamento da iluminação natural no ambiente construído pode ser feito utilizando-se de diversas ferramentas, como as métricas de desempenho da luz natural, que permitem verificar requisitos mínimos de desempenho e a probabilidade de desconforto visual. Seu cálculo pressupõe a definição de parâmetros, como a malha de sensores no plano de trabalho, que comumente são uniformemente distribuídas no plano de trabalho. Esta tese tem objetivo de identificar a relação entre a disposição da malha de pontos de cálculo da iluminação natural e as métricas de desempenho, bem como propor uma metodologia para a definição de malhas de densidades não uniformes. O estudo dividiu-se em três etapas visando identificar a influência da quantidade de pontos, da setorização do plano de trabalho e de parâmetros como orientação do modelo, latitude e obstrução de entorno a fim de definir a malha de densidade não-uniforme. Para todas as fases foi utilizado um modelo de ambiente padrão com abertura lateral em fita. Na primeira fase variou-se a malha de pontos de 2x2 a 15x15 no plano de trabalho, na segunda o plano foi dividido em nove setores de mesma área, em que foi variada a malha de 1x1 a 8x8 dentro do setor e na terceira foram avaliadas duas orientações, quatro latitudes e quatro situações de obstrução de entorno. A simulação computacional foi realizada pelo TropLux na versão 7 para a primeira etapa e 8 nas demais. As análises exploratória e estatística utilizaram as ferramentas de ANOVA, teste de Tukey. Os resultados permitiram a definição da metodologia proposta, que é a divisão em duas malhas, uma para cálculo da iluminância direta e outra para a refletida. Para a setorização do plano de trabalho foi identificado um valor de referência de 1,0 set/m² para a direta e 0,4 set/m² para a refletida. Para a definição da densidade de pontos no setor para a componente direta foi utilizado o coeficiente de variação do Fator de Visão de Céu, cujo divisor foi de 0,6, onde setores abaixo a densidade de pontos é de 1,0 pt/m² e setores acima a densidade é de 9.0 pt/m². Para a malha da componente refletida o parâmetro foi a distância angular à janela, onde foi identificado um valor divisor de 50°, onde abaixo dele a densidade de pontos é de 0.4 pt/m² e setores acima a densidade é de 7.0 pt/m². A aplicação da metodologia apontou que há ganho em tempo de processamento sem perda significativa nos cálculos das métricas com a aplicação da malha não-uniforme. A melhor definição da malha tem como consequência maior precisão nos resultados das métricas e proporciona aos profissionais de arquitetura e engenharia tenham ferramentas que permitam uma melhor representação do desempenho de seus projetos, permitindo uma melhor definição das estratégias de aproveitamento da luz natural.

Palavras-Chave: Iluminação natural. Malha de pontos. Índices de desempenho da luz natural. Simulação computacional.

ABSTRACT

The study of the behavior of daylight in the built environment can be done using several tools, such as daylight performance metrics, which allow to verify minimum performance requirements and the probability of visual discomfort. Its calculation presupposes the definition of parameters, such as the points grid in the work plane, which are commonly evenly distributed in the work plane. This thesis aims to identify the relationship between the arrangement of the mesh of natural lighting calculation points and performance metrics, as well as to propose a methodology for the definition of meshes of non-uniform densities. The study was divided into three stages aiming at identifying the influence of the quantity of points, the sectorization of the work plan and parameters such as model orientation, latitude and obstruction of the surroundings in order to define the non-uniform density grid. For all phases, a standard environment model with lateral opening was used. In the first phase the 2x2 to 15x15 point grid was varied in the work plane, in the second the plane was divided into nine sectors of the same area, where the grid was varied from 1x1 to 8x8 within the sector and in the third phase two orientations, four latitudes and four situations of surrounding obstruction were evaluated. The computational simulation was performed by TropLux in version 7 for the first stage and 8 for the others. The exploratory and statistical analyses used the tools of ANOVA, Tukey's test. The results allowed the definition of the proposed methodology, which is the division into two grids, one for the calculation of the direct illuminance and the other for the reflected one. For the sectorization of the work plan, a reference value of 1.0 sect/m² was identified for the direct one and 0.4 sect/m² for the reflected one. For the definition of the density of points in the sector for the direct component it was used the coefficient of variation of the Factor of Sky Vision, whose divisor was 0.6, where sectors below the density of points is 1.0 pt/m² and sectors above the density is 9.0 pt/m². For the mesh of the reflected component the parameter was the angular distance to the window, where a dividing value of 50° was identified, where below it the density of points is 0.4 pt/m² and sectors above it the density is 7.0 pt/m². The application of the methodology pointed out that there is a gain in processing time without significant loss in the metric calculations with the application of the non-uniform grids. The better definition of the grid has as a consequence greater precision in the results of the metrics and provides architecture and engineering professionals with tools that allow a better representation of the performance of their projects, allowing a better definition of strategies for the use of daylight.

Keywords: Daylighting. Grid of points. Daylight metrics. Computer simulation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura da Tese	23
Figura 2 - Trajetória aparente do sol para a latitude de 42° em projeção plana e em perspectiva.	27
Figura 3 - Exemplo de cartas solares em projeção cilíndrica e plana estereográfica, respectivamente, para a latitude de 40°.....	28
Figura 4 - Modelo em escala de uma edificação com o elemento de estudo da trajetória solar desenvolvido por Marks e Woodwell montado para determinar a direção do raio de sol no solstício de inverno.....	29
Figura 5 - Aparelho para determinação da posição solar desenvolvido por Woodwell (1914).....	29
Figura 6 - Modelo original do heliodon desenvolvido por Dufton e Beckett. O plano B representa a superfície terrestre e pode ser rotacionada para representar a posição aparente do sol na abóbada.	30
Figura 7 - Análise da disponibilidade de luz natural em modelo utilizando um céu artificial no laboratório da Bartenbach, na cidade de Munique, Alemanha.....	31
Figura 8 - Modelo em escala de uma edificação utilizado para o estudo sob condições de céu real	32
Figura 9 - Fluxograma dos elementos de entrada e saída envolvidos na simulação computacional da luz natural.	35
Figura 10 - Exemplo e discretização de planos para o cálculo do fator de forma utilizado no método da radiosidade.	36
Figura 11 - Sequência para composição de imagem a partir do método da radiosidade: (a) Ambiente apenas com luz direta. (b) Ambiente depois de processada a radiosidade 64 vezes. (c) Inserção da iluminação nas aberturas. (d) Iluminação indireta utilizando a reflexão entre volumes internos. (e) Composição final sem iluminação direta. (f) Imagem Final.	37
Figura 12 - Possibilidades de interações entre o raio e as superfícies no método do raio traçado.....	38
Figura 13 - Exemplo de geometria complexa de uma quadra residencial processada utilizando o TropLux.	39
Figura 14 - Interface do Software TropLux 8 - Tela para inserção de projetos	40
Figura 15 - Exemplo da aplicação do Diagrama de Waldram para uma janela simples do tipo Bay Window	42
Figura 16 - Diagrama de pontos de Pleijel para um céu encoberto (a) e um diagrama de distribuição de luminâncias de Millet para céu Claro (b)	43
Figura 17 - Exemplo de aplicação dos transferidores do método BRS	43
Figura 18 - Régua para o cálculo do Fator de Luz do Dia da BRS	44
Figura 19 - Comparação entre os métodos de cálculo da Autonomia de Luz Natural normal e contínua.....	49
Figura 20 - Representação gráfica do conceito da AIE e a formula de cálculo	51
Figura 21 - Cenários de cânion urbano para as cidades de Hong Kong (a) e Santa Catarina (b).....	58
Figura 22 - Fator de Céu ponderado (FCP) pelo cosseno.....	60
Figura 23 - Exemplos de gráficos de dispersão para correlação onde (A) e (B) são lineares, (D) é não-linear e (C) não é possível identificar correlação	65
Figura 24 - Nuvem de dados com ênfase em tracejado em dois pontos fora do comportamento geral dos dados, identificados como Valores espúrios	68

Figura 25 - Planta baixa e corte do ambiente utilizado nas simulações computacionais para as fases 1 e 2. (Unidade: m)	71
Figura 26 - Gráficos de iluminância média anual (EMA) global e suas componentes. A escala do eixo de DP foi mantida igual em todos os gráficos para facilitar a comparação. Alguns gráficos possuem picos além do intervalo do eixo, mas não comprometem a análise dos resultados.	75
Figura 27 - Gráficos de Uniformidade média anual (UMA) global e suas componentes. A escala do eixo de DP foi mantida igual em todos os gráficos para facilitar a comparação. Alguns gráficos possuem picos além do intervalo do eixo, mas não comprometem a análise dos resultados.	77
Figura 28 - Gráficos das métricas ALN, ALNc, ALNe e ESA. A escala do eixo de DP foi mantida igual em todos os gráficos para facilitar a comparação. Alguns gráficos possuem picos além do intervalo do eixo, mas não comprometem a análise dos resultados	78
Figura 29 - Gráficos das faixas de IULN. A escala do eixo de DP foi mantida igual em todos os gráficos para facilitar a comparação. Alguns gráficos possuem picos além do intervalo de do eixo, mas não comprometem a análise dos resultados	79
Figura 30 - Planta baixa com a distribuição de setores utilizada. Em cada setor está informado a sua posição na linha, em caracteres numéricos, e na coluna, em letras. Também são informados o fator de céu ponderado e o fator de visão de céu, respectivamente	84
Figura 31 - Gráficos de iluminância média anual (EMA) global, suas componentes e a DP para modelos com janela orientada a leste. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise	86
Figura 32 - Gráficos de iluminância média anual (EMA) global, suas componentes e a DP para modelos com janela orientada a sul. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise	88
Figura 33 - Gráficos de IULN para os modelos com janela orientada a leste. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise.....	90
Figura 34 - Gráficos de IULN para os modelos com janela orientada a sul. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise.	92
Figura 35 - Gráficos de U, ALN, ALNe e ESA para os modelos com janela orientada a leste. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise.....	93
Figura 36- Gráficos de U, ALN, ALNe e ESA para os modelos com janela orientada a sul. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise	95
Figura 37 - Resultados para a ANOVA e o teste de Tukey nos os modelos com janela orientada a Leste para a EMA global e suas componentes	97
Figura 38 - Resultados para a ANOVA e o teste de Tukey nos os modelos com janela orientada a Sul.....	99
Figura 39 - Síntese dos resultados obtidos de EMA e UMA para a fase 1	102
Figura 40 - Síntese dos resultados obtidos das métricas ALN, ALNc, ALNe, ESA e IULN para a fase 1.....	103
Figura 41 - Fluxograma de etapas de processamento em que se baseiam as etapas metodológicas propostas	107
Figura 42 - Quatro situações de visão de céu propostas para o estudo final.	108
Figura 43 - Esquema da distância linear (DL) e angular (DA) para uma malha de 4x4 setores.....	112

Figura 44 - Mapa com a posição das cidades selecionadas: (a) Macapá, (b) Maceió, (c) Vitória e (d) Porto Alegre	113
Figura 45 - Combinações de variáveis estudadas	114
Figura 46 - Fluxograma das etapas de processamento dos dados para definição da Malha Setorial Mínima.....	115
Figura 47 - Fluxograma das etapas de processamento dos dados na fase 2, com objetivo de definir a setorização	118
Figura 48 - Fluxograma das etapas de processamento dos dados na fase 2, com objetivo de definir a densidade de pontos por setor	120
Figura 49 - Resultados da MSmin para a setorização de 4x4 nas cidades de Macapá e Porto Alegre, para o modelo sem obstrução externa.	122
Figura 50 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo sem obstrução externa (0) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8.....	124
Figura 51 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo com obstrução de topo (45T) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8.	126
Figura 52 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo com obstrução de frente (45F) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8	127
Figura 53 - FVC para os modelos do tipo 0, 45T e 45F com distância entre os níveis de 1%, sobrepostos com as divisões das setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8.....	128
Figura 54 - Resultados da MSmin para as cidades de Macapá e Vitória nos modelos sem obstrução de entorno e para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8	131
Figura 55 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo sem obstrução externa (0) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8.....	133
Figura 56 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo com obstrução de frente (45F) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8	133
Figura 57 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo com obstrução de frente (45F) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8	134
Figura 58 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo com obstrução de frente (45F) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8	134
Figura 59 – EMA direta (CD+SD) e suas componentes céu direto (CD) e sol direto (SD) para todos os modelos e variações de setores	139
Figura 60- Coeficiente de Variação da EMA direta (CD+SD) e suas componentes céu direto (CD) e sol direto (SD) para todos os modelos e variações de setores	140
Figura 61 - EMA global refletida (CR+SR) e suas componentes céu refletido (CR) e sol refletido (SR) para todos os modelos e variações de setores	144
Figura 62 – Coeficiente de Variação da Iluminância global refletida (CR+CR) e suas componentes céu refletido (CR) e sol refletido (CR) para todos os modelos e variações de setores.....	146
Figura 63 - Gráfico de dispersão do FVC (a) e FCP (b) versus densidade de pontos no setor para a componente direta da iluminância.....	151
Figura 64 - Gráfico de dispersão do Coeficiente de Variação de FVC (a) e FCP (b) versus densidade de pontos no setor para a componente direta da iluminância.....	152
Figura 65 - Gráfico da ocorrência de malhas da componente direta nos setores versus FVC.....	153
Figura 66 - Gráfico da ocorrência de malhas nos setores versus coeficiente de variação de FVC.....	154
Figura 67 - Gráfico de dispersão de Distância Linear (D_L) (a) e Distância Angular (D_A) (b) versus densidade de pontos por setor para a componente refletida da iluminância.....	155

Figura 68 - Gráfico da ocorrência de malhas nos conjuntos de setores para a componente refletida da iluminância.....	156
Figura 69 - Gráfico da ocorrência percentual de malhas nos conjuntos de setores na borda e no centro do plano de trabalho para a componente refletida da iluminância.....	157
Figura 70 - Fluxograma com as etapas de cálculo da malha de pontos proposta na tese.....	159
Figura 71 - Modelo de geometria urbana utilizado nos processamentos	161
Figura 72 - Geometria do ambiente utilizado nos processamentos da etapa final	162
Figura 73 - Malha da componente direta e da componente refletida para o estudo final.....	164
Figura 74 - Síntese dos processamentos da fase final	164
Figura 75 - Resultados de EMA, UMA, ALNe, ESA e IULN para a ultima etapa de análise	166
Figura 76 - Tempo de processamento para os modelos e malhas estudados.....	168
Figura 77 - Forma de apresentação dos resultados da Análise de Variância e Teste de Tukey	237
Figura 78 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Macapá, com obstrução de entorno 0.....	238
Figura 79 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Macapá, com obstrução de entorno 45T	239
Figura 80 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Macapá, com obstrução de entorno 45F	240
Figura 81 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 0	241
Figura 82 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 45T.....	242
Figura 83 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 45F.....	243
Figura 84 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Vitória, com obstrução de entorno 0.....	244
Figura 85 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Vitória, com obstrução de entorno 45T	245
Figura 86 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Vitória, com obstrução de entorno 45F.....	246
Figura 87 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 0	247
Figura 88 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 45T	248
Figura 89 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 45F	249
Figura 90 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Macapá., com obstrução de entorno 0.....	250
Figura 91 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Macapá., com obstrução de entorno 45T	251
Figura 92 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Macapá., com obstrução de entorno 45F	252
Figura 93 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Macapá., com obstrução de entorno 90.....	253
Figura 94 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 0	254
Figura 95 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 45T	255

Figura 96 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 45F.....	256
Figura 97 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 90.....	257
Figura 98 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Vitória, com obstrução de entorno 0.....	258
Figura 99 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Vitória, com obstrução de entorno 45T.....	259
Figura 100 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Vitória., com obstrução de entorno 45F.....	260
Figura 101 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Vitória., com obstrução de entorno 90.....	261
Figura 102 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 0.....	262
Figura 103 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 45T.....	263
Figura 104 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 45F.....	264
Figura 105 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 90.....	265

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de pontos de análise da iluminação natural segundo a norma brasileira e mexicana.....	56
Tabela 2 - Síntese da matriz de correlação para os dados nas duas orientações estudadas. A legenda das cores consta no final da tabela.....	81
Tabela 3 - Síntese da ANOVA e do teste de Tukey apresentando os agrupamentos de cada componente. As células azuis na coluna Índice indicam os testes de ANOVA que apontaram diferença entre as médias. As células verdes em destaque indicam o ponto de estabilidade das médias.	82
Tabela 4 - Síntese dos resultados obtidos para variação na densidade de pontos por setor para as orientações sul e leste. Os resultados apresentados são relativos ao teste de Tukey.....	104
Tabela 5 - Malha de setores proposta para a componente direta.	109
Tabela 6 - Malha de pontos dentro dos setores proposta para a componente direta	110
Tabela 7 - Malha de pontos dentro dos setores proposta para a componente refletida	111
Tabela 8 - Quantidade de pontos total no plano de trabalho para os modelos analisados no estudo da iluminância direta.	130
Tabela 9 - Quantidade de pontos total no plano de trabalho para os modelos analisados no estudo da iluminância refletida	136
Tabela 10 - Coeficientes de variação para as diferentes setorizações, calculados a partir dos dados de EMA e CV para a EMA direta e suas componentes.	141
Tabela 11 - Setorização ideal para cada modelo estudado e cada componente, calculada a partir da quantidade de pontos.	142
Tabela 12 - Coeficientes de variação para as diferentes setorizações, calculados a partir dos dados de iluminância e desvio padrão para a iluminância refletida e suas componentes.....	147
Tabela 13 - Setorização ideal para cada modelo estudado e cada componente, calculada a partir da quantidade de pontos	149
Tabela 14 - Refletância das superfícies utilizadas no modelo da etapa final	162
Tabela 24 - Síntese dos resultados obtidos para iluminância e uniformidade apresentando a malha e sua área relativa para cada índice estudado.	236
Tabela 25 - Síntese dos resultados obtidos para iluminância e uniformidade apresentando o número de pontos por eixo (PPE) e a área relativa para cada índice estudado...	236

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos tipos de céu proposta pela CIE.....	33
Quadro 2 - Descrição das zonas da Iluminância útil de luz natural	54
Quadro 3 - Categorização das técnicas e objetivos das ferramentas de análise da estatística multivariada	63
Quadro 4 - Classificação dos valores para correlação linear de Pearson, em que p é o valor da correlação	65
Quadro 5 - Resumo das métricas utilizadas, sua origem e os valores de referência adotados	72
Quadro 6 - Disposição da malha de pontos utilizada na primeira fase do estudo em cada modelo.....	73
Quadro 7 - Malhas de pontos por setor utilizadas na segunda fase.....	85
Quadro 8 - Métricas de avaliação do desempenho da Luz Natural utilizadas no estudo final	165

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ALN	Autonomia de luz natural
ALNc	Autonomia de luz natural contínua
ALNe	Autonomia de luz natural espacial
ANOVA	Análise de variância
CD	Componente de céu direto
CIE	Commission internationale de l'éclairage
CR	Componente de céu refletido
CV	Coefficiente de variação
D _A	Distância angular à abertura
DDL	Céu de distribuição dinâmica de luminâncias
D _L	Distância linear à abertura
EMA	Iluminância média anual
ESA	Exposição solar anual
FCP	Fator de céu ponderado
FLD	Fator de luz do dia
FVC	Fator de visão de céu
IES	Illuminating engineering society
ISO	International organization for standardization
IULN	Iluminância útil de luz natural
MSmin	Malha setorial mínima
pt	Ponto
set	Setor
SD	Componente de sol direto
SR	Componente de sol refletido
UMA	Uniformidade média anual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	22
1.2	ESTRUTURA DA TESE	23
2	A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA LUZ NATURAL	25
2.1	FORMAS DE AVALIAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL.....	26
2.1.1	<i>As Cartas Solares</i>	26
2.1.2	<i>Modelos Físicos em Escala</i>	28
2.1.3	<i>Modelos Matemáticos de Céu</i>	32
2.1.4	<i>A Simulação Computacional</i>	33
2.2	MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA LUZ NATURAL	41
2.2.1	<i>Fator de Luz do Dia (FLD)</i>	41
2.2.2	<i>Iluminância (E)</i>	46
2.2.3	<i>Uniformidade da Luz Natural (U)</i>	46
2.2.4	<i>Autonomia de Luz Natural. (ALN)</i>	48
2.2.5	<i>Autonomia de Luz Natural Contínua (ALNc)</i>	49
2.2.6	<i>Autonomia de Luz Natural Zonal (ALNz)</i>	49
2.2.7	<i>Autonomia de Luz Natural Máxima (ALNmax)</i>	50
2.2.8	<i>Autonomia de Luz Natural Temporal (ALNt)</i>	51
2.2.9	<i>Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe)</i>	52
2.2.10	<i>Autonomia de Luz Natural Mínima (ALNm)</i>	53
2.2.11	<i>Iluminância Útil de Luz Natural (IULN)</i>	53
2.2.12	<i>Saturação da Luz Natural (SLN)</i>	54
2.2.13	<i>Exposição Solar Anual (ESA)</i>	55
2.3	PARÂMETROS DE CÁLCULO DAS MÉTRICAS	55
2.4	ÍNDICES DE AVALIAÇÃO DA VISÃO DE CÉU.....	58
2.4.1	<i>O Fator de Visão de Céu (FVC)</i>	58
2.4.2	<i>O Fator de Céu Ponderado (FCP)</i>	60
2.5	CONCLUSÃO.....	61
3	ESTATÍSTICA APLICADA AO TRATAMENTO DE DADOS EM CONFORTO AMBIENTAL.	62

3.1	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO.....	64
3.2	ANOVA	66
3.3	TESTE DE TUKEY.....	67
3.4	TRATAMENTO DE VALORES ESPÚRIOS	67
3.5	CONCLUSÃO.....	69
4	INFLUÊNCIA DA MALHA DE PONTOS E SUA SETORIZAÇÃO NAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO DA LUZ NATURAL	70
4.1	FASE 1: METODOLOGIA.....	70
4.2	FASE 1: RESULTADOS E ANÁLISES	74
4.3	FASE 2: METODOLOGIA.....	84
4.4	FASE 2: RESULTADOS E ANÁLISES	85
4.5	CONCLUSÃO.....	101
5	MALHAS NÃO-UNIFORMES E SUA INFLUÊNCIA NAS COMPONENTES DA LUZ NATURAL	106
5.1	METODOLOGIA.....	106
5.1.1	<i>Geometria, Orientação e Entorno</i>	<i>108</i>
5.1.2	<i>Malha A - Componentes Diretas.....</i>	<i>108</i>
5.1.3	<i>Malha B - Componentes Refletidas.....</i>	<i>110</i>
5.1.4	<i>Parâmetros de Processamento.....</i>	<i>112</i>
5.1.5	<i>Análise dos Resultados.....</i>	<i>114</i>
5.2	RESULTADOS.....	121
5.2.1	<i>Análise Exploratória.....</i>	<i>121</i>
5.2.2	<i>Análise Estatística.....</i>	<i>138</i>
5.3	CONCLUSÃO.....	157
6	ESTUDO COMPARATIVO: APLICAÇÃO DA MALHA NÃO-UNIFORME	160
6.1	METODOLOGIA.....	160
6.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	166
6.3	CONCLUSÃO.....	168
7	CONCLUSÃO FINAL.....	170
7.1	OBJETIVOS DA TESE.....	170

7.2	A DENSIDADE DE PONTOS.....	171
7.3	A SETORIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHO.....	173
7.4	A MALHA DE DENSIDADE NÃO UNIFORME.....	174
7.5	A FERRAMENTAS DE ESTATÍSTICA.....	176
7.6	APLICAÇÃO DA MALHA DE DENSIDADE NÃO UNIFORME.....	177
7.7	LIMITAÇÕES.....	178
7.8	DANDO CONTINUIDADE À PESQUISA.....	178
7.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	179
	REFERÊNCIAS.....	180
	APÊNDICES.....	200
	APÊNDICE 1 - ARTIGO 1 PUBLICADO NOS ANAIS DO ENTAC 2020.....	200
	APÊNDICE 2 - ARTIGO 2 PUBLICADO NA REVISTA AMBIENTE CONSTRUÍDO COM OS RESULTADOS DA FASE 1 DO ESTUDO.....	209
	APÊNDICE 3 - ARTIGO 3 PUBLICADO NOS ANAIS DO ENTAC 2020.....	227
	APÊNDICE 4 - DADOS NUMÉRICOS: FASES 1 E 2 - SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	236
	APÊNDICE 5 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE DE TUKEY A ILUMINÂNCIA E SUAS COMPONENTES.....	237

1 INTRODUÇÃO

O uso da luz natural no ambiente construído foi uma importante estratégia para o desenvolvimento das edificações ao longo da história. Ao passo que os ambientes ganhavam novas dimensões, com avanços tecnológicos como o arco ou as estruturas metálicas, grandes vãos permitiam a maior captação de luz natural, seja por aberturas laterais ou zenitais (BAKER; STEEMERS, 2002). Com a implementação de novas técnicas construtivas e de novas tecnologias de condicionamento artificial dos ambientes, as atribuições do arquiteto relativas às variáveis de conforto dentro do ambiente, seja ele térmico, lumínico ou acústico, foram sendo gradativamente esquecidas, principalmente após a primeira metade do século XX (CORBELLA; YANNAS, 2010). Esse panorama começa a mudar a partir da introdução do conceito de sustentabilidade e de noções de espaço urbano mais saudáveis para seus usuários. A nova visão de arquitetura que surge permite a criação de espaços economicamente viáveis, que atendam às necessidades sociais, respeitando os sistemas naturais (EDWARDS, 2013).

Atualmente as novas tecnologias ligadas à iluminação, a exemplo dos LED, permitem que a edificação consuma menos energia, entretanto, outros aparelhos como aqueles de refrigeração artificial e aquecimento ainda continuam sendo grandes consumidores. Em muitas situações observa-se presença de janelas para a entrada de luz natural, mas, seja pela carga térmica associada à luz natural ou ao ofuscamento, ainda se observa a utilização de suplementação de luz artificial em locais onde a natural poderia suprir a demanda (TREGENZA; WILSON, 2011).

Para Oakley, Riffat e Shao (2000) o uso da iluminação natural de forma mais eficiente dentro das edificações pode gerar de 20 a 30% de economia em energia elétrica quando comparado ao custo total da construção. No Brasil, os estudos relativos ao consumo de energia elétrica para iluminação natural do ponto de vista da qualidade do ambiente são escassos, como afirma Loss (2013). Autores como Lamberts, Dutra e Pereira (2014) apontam que o consumo de iluminação artificial nas edificações corresponde a até 24% do consumo de energia elétrica em edifícios empresariais e 19% nos residenciais, identificando o potencial de melhoria de consumo nesses setores.

As vantagens da utilização da iluminação natural não se limitam ao consumo energético, mas permitem a criação de ambientes mais agradáveis ao ocupante, gerando benefícios psicofisiológicos pelo contato constante com o exterior e suas variações (DIAS *et al.*, 2018). As variações diárias, bem como condições climáticas e estações do ano, são importantes para

marcar os ritmos biológicos e psicológicos humanos, melhorando sua qualidade de vida, entretanto, seu uso deve ser estudado pois níveis muito altos de radiação trazem consigo uma carga térmica elevada e desconforto visual. (ALMEIDA; RUIZ; GRAÇA, 2012).

A definição de padrões de referência para a quantidade de luz natural dentro do ambiente construído sempre foi um desafio para aqueles que se aplicam ao estudo da relação entre percepção e estímulos, como já apontava Hopkinson (1963). A adoção de um valor único de iluminância ignora aspectos relativos à visão, como a amplitude do campo visual e as possibilidades de contraste excessivo e ofuscamento. Segundo Moon (1936) a quantidade de luz no ambiente não pode ser baseada exclusivamente em aspectos físicos, por mais importante que elas pareçam ser, mas deve ser levada em consideração a pessoa que usa o espaço, a tarefa que realiza, sua posição no ambiente, a localização do plano de trabalho e uma gama de fatores fisiológicos e psicológicos que a define.

As tentativas para definição de ferramentas que consigam avaliar de forma abrangente o desempenho luminoso das edificações tem se sucedido ao longo das últimas décadas e vem se tornando cada vez mais sofisticadas. O desenvolvimento de ferramentas como as cartas solares, esquematizadas por Atkinson (1912) para estudo da trajetória solar, passando pelas ferramentas de reprodução da posição solar, como o heliodon de Dufton e Beckett (1932), e de avaliação do desempenho de ambientes como o fator de luz do dia (TROTTER, 1911) permitiram um melhor entendimento do comportamento da luz natural e sua relação com o ambiente construído.

A avaliação de ambientes, que começa com o estudo do fator de luz do dia, se expandiu em diversas novas métricas que surgem principalmente a partir da década de 80 do século XX. Algumas métricas, como a Autonomia de Luz Natural (ASE, 1989), foram se desenvolvendo e incorporando novos parâmetros de cálculo que permitem avaliar melhor o desempenho da luz natural nas edificações. Importante destacar que a aplicação das métricas atualizadas de avaliação da iluminação natural está associada a um volume de dados grande e que para sua obtenção são utilizados softwares de simulação computacional em iluminação que permitem avaliar o desempenho de ambientes em várias etapas do processo de projeto e depois da edificação construída. O uso da simulação implica na definição de parâmetros como a quantidade de pontos de medição, que muda de acordo com a metodologia de cálculo do programa e de acordo com a métrica que se deseja obter.

Um dos principais parâmetros é a quantidade de pontos de análise. Até então os pontos são dispostos sempre em uma malha regular, distribuídos de forma uniforme pelo ambiente,

tanto em normas nacionais (ABNT, 2013a) quanto em normativos internacionais (IES, 2012). Entretanto, estudo recente de Brembilla, Mardaljevic e Anselmo (2015) aponta que outros tipos de distribuição podem promover maior precisão nos resultados e menor tempo de processamento pelos softwares. Os autores afirmam que a malha de pontos de simulação influencia no cálculo das métricas de avaliação de desempenho da luz natural e propõem a adoção de malhas de pontos não-uniformemente distribuídas, levando em consideração para sua definição principalmente a distância à abertura.

O uso de softwares de simulação em iluminação natural para avaliação do desempenho das edificações sempre encontrou dificuldades nos escritórios de arquitetura, principalmente nas etapas iniciais do projeto, como afirmam diversos trabalhos (KOWALTOLWSKI *et al.*, 1998; DELBIN, 2006; OLIVEIRA, BITTENCOURT, DÓRIA, 2019). Seu uso exige do projetista o conhecimento de diversos dados e parâmetros de processamento que muitas vezes requer conhecimento específico na área, tornando complicada a sua aplicação na rotina projetual. A facilitação no uso das ferramentas, bem como o aumento na precisão dos resultados, auxilia na sua utilização durante as fases do projeto arquitetônico.

Diante da reduzida quantidade de estudos sobre as possibilidades de distribuição dos pontos de análise da luz natural de forma não uniforme pelo plano de trabalho, e tendo como base estudos anteriores, é que a proposta desta tese se estrutura.

1.1 Objetivos

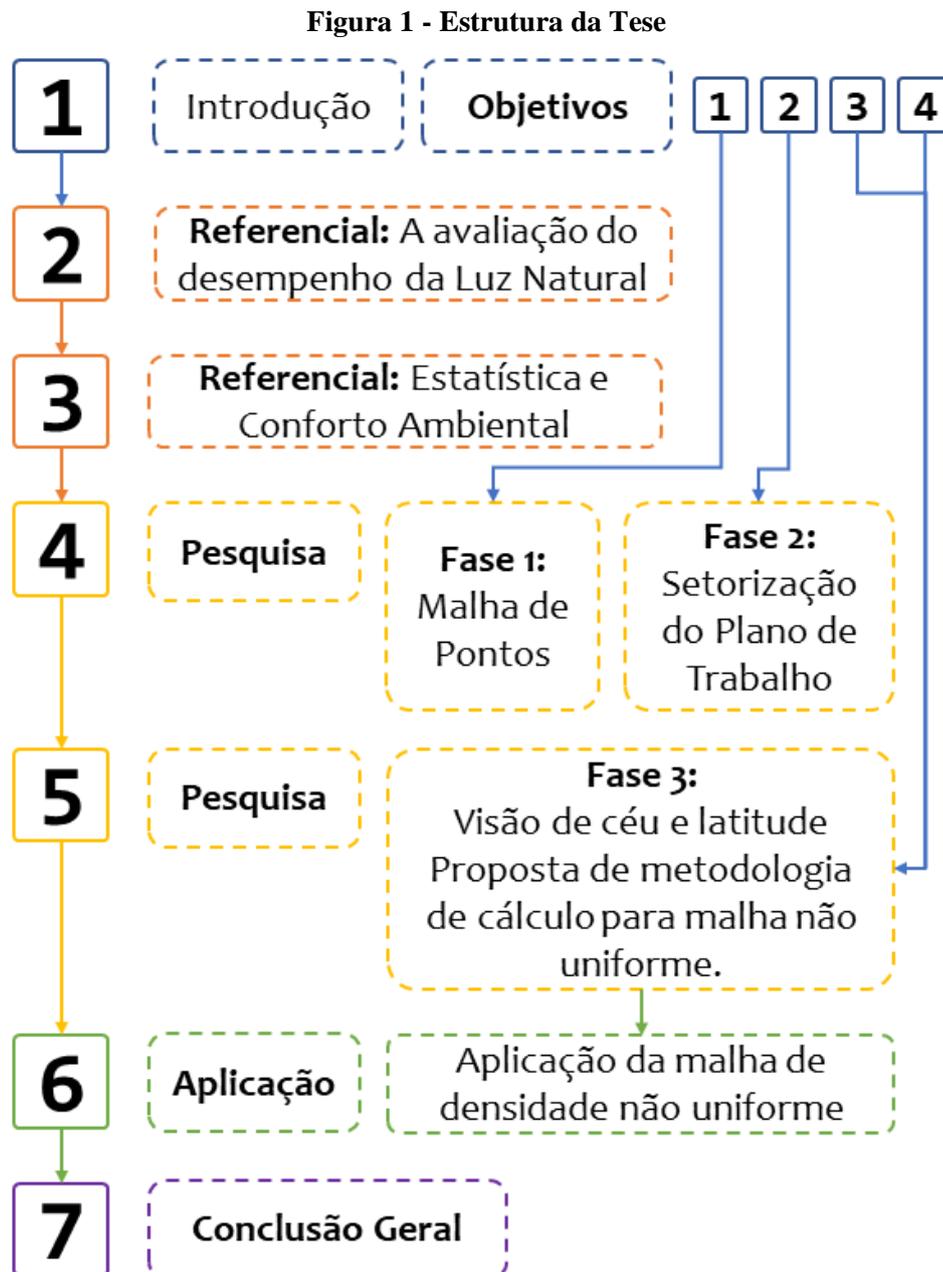
O objetivo geral da pesquisa é identificar a relação entre a disposição da malha de pontos de cálculo da luz natural e sua influência na avaliação de desempenho do ambiente construído a fim de propor recomendações para definições de malhas não uniformes.

São objetivos específicos:

- 1) Identificar a influência da quantidade total de pontos da malha no cálculo das métricas de avaliação do desempenho luminoso.
- 2) Verificar a influência da variação da densidade em setores da malha e sua relação com o cálculo da iluminância global e suas componentes.
- 3) Avaliar a relação entre as variáveis de latitude e obstrução de entorno com a setorização do plano de trabalho e a distribuição de densidades de pontos na malha.
- 4) Propor uma metodologia para a definição de malha de pontos da simulação de densidades não uniformes.

1.2 Estrutura da tese

Toda a estrutura da tese está apresentada na Figura 1, estruturada por capítulos.



Fonte: Elaborada pelo autor

No primeiro capítulo foram apresentadas a introdução e os objetivos geral e específicos da tese. No segundo capítulo serão abordados os conceitos de iluminação no ambiente construído, as formas de avaliação do desempenho do ambiente, o desenvolvimento histórico das ferramentas de avaliação da iluminação natural e suas métricas, concluindo com as metodologias de simulação em iluminação natural.

No terceiro capítulo são tratadas as ferramentas estatísticas utilizadas na análise de dados em conforto ambiental. Posteriormente, no capítulo 4, são apresentados os estudos relativos ao primeiro e segundo objetivos específicos, contemplando a metodologia utilizada, os resultados obtidos e as conclusões desta etapa. Na sequência, capítulo 5, é apresentado o estudo principal da tese, buscando responder aos objetivos específicos três e quatro, da mesma forma que o anterior, com metodologia, resultados e conclusões. No capítulo 6 é apresentada uma aplicação da malha de densidades não uniformes proposta na tese.

Por fim são apresentadas as conclusões gerais da tese, as limitações e sugestões de trabalhos futuros, no capítulo 7. Foi dada preferência a apresentação de resultados de forma gráfica, entretanto, para todos eles os dados numéricos constam nos apêndices, bem como a produção de artigos derivados da tese durante o período.

2 A avaliação do desempenho da luz natural

A utilização da iluminação natural nas edificações e sua conseqüente influência na forma plástica delas percorre todos os períodos da história da arquitetura. Importante notar que sua necessidade surge como requisito funcional e gradualmente se transforma em um elemento artístico, retornando atualmente a ter um grande peso funcional.

A preocupação com o aproveitamento dos recursos naturais dentro das edificações foi estratégia importante para o desenvolvimento das construções ao longo do tempo. Os ambientes ganham novas dimensões com o aperfeiçoamento dos sistemas estruturais, a exemplo do arco, tornando possível a execução de grandes vãos com aberturas zenitais, ideais para captação de luz natural (BAKER; STEEMERS, 2002). Com a evolução das técnicas construtivas e a abundância de combustíveis de baixo custo, principalmente após a primeira metade do século XX, as atribuições do arquiteto relativas ao conforto térmico, acústico e luminoso, e suas inter-relações com o entorno e com os meios naturais, foram gradativamente esquecidas em substituição aos meios artificiais (CORBELLA; YANNAS, 2010).

A história da arquitetura muitas vezes se confunde com a história da janela (LE CORBUSIER, 1991 apud LEATHERBARROW; MOSTAFAVI, 2002) e da forma como a luz natural penetra nos ambientes, permitindo que o ar entre, que a luminosidade permeie o ambiente e que o usuário possa ter visão do exterior (PHILLIPS, 2004). Para Lam (1977), o ato de projetar utilizando-se da luz natural nos ambientes permite a criação de espaços mais confortáveis e produtivos, associados à redução do custo energético da edificação. O autor aponta ainda que tal premissa tem sido negligenciada na arquitetura moderna por não se valer da luz natural como um dos objetivos no processo de concepção arquitetônica.

Com o tempo, os requisitos mínimos de uso e de conforto visual utilizando a iluminação natural mudaram e tem se tornado cada vez mais técnicos. Atualmente observa-se uma tendência de regulamentação do seu uso através de processos normatizados e definidos que visam a determinação de parâmetros a serem atingidos. Nesse contexto surgem as normas relativas à iluminação natural, bem como as regulamentações e certificações das edificações. Todos esses documentos possuem como princípio ordenador o uso da luz em vista do conforto do usuário e da redução do custo energético com iluminação e refrigeração artificial.

Além das vantagens econômicas obtidas com a utilização da luz natural, os aspectos humanos também precisam ser atendidos nas edificações. A utilização desse recurso proporciona um ambiente mais agradável aos ocupantes, como também benefícios

psicofisiológicos e contato constante com o exterior. Segundo Robbins (1986), a variação da luz natural nas diferentes horas do dia, condições climáticas e estações do ano são importantes para marcar os ritmos biológicos e psicológicos dos indivíduos, melhorando sua qualidade de vida. Mesmo diante de todos os benefícios que o uso da iluminação natural traz aos ambientes seu uso deve ser estudado, pois níveis muito altos de radiação trazem consigo uma carga térmica elevada, bem como desconforto visual e até problemas de saúde.

2.1 Formas de avaliação da iluminação natural

Diversas ferramentas podem ser utilizadas com a finalidade de calcular a quantidade de luz natural dentro no ambiente construído, bem como a influência da inserção de elementos de sombreamento e captação de luz. Algumas ferramentas simplificadas, a exemplo da carta solar, permitem que se analise a insolação em fachadas e até o dimensionamento de elementos de proteção solar, entretanto, sua aplicabilidade se torna restrita à medida em que aumenta a complexidade da geometria do ambiente estudado.

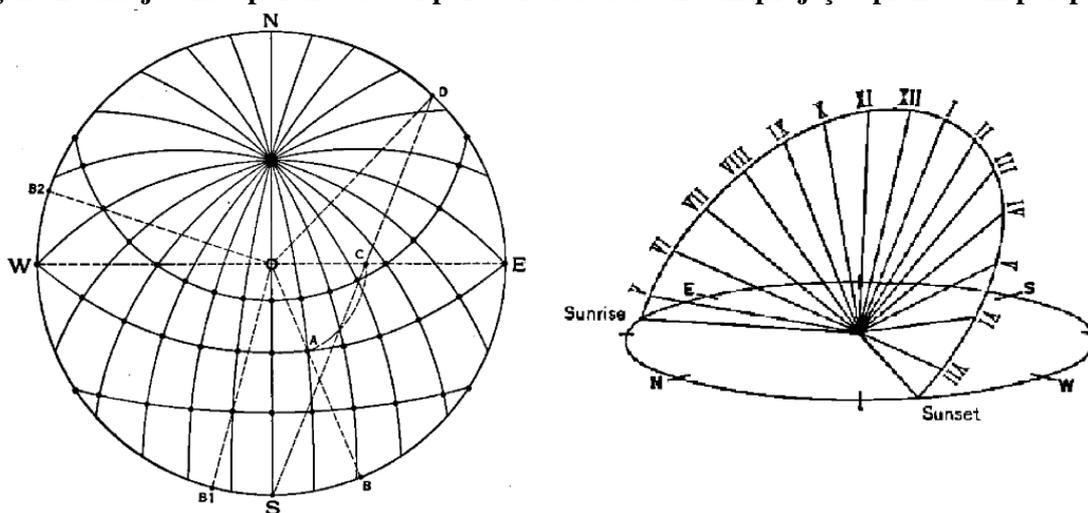
Algumas metodologias como os modelos em céus artificiais ou naturais permitem uma melhor análise qualitativa, entretanto, com o avanço das ferramentas computacionais o uso de simulação tem se mostrado, diante da complexidade dos modelos analisados, a solução mais viável, mas sua aplicação também possui limitações, que serão apresentadas na seção 2.1.4. Nesse contexto as ferramentas de avaliação da luz natural atravessam um longo percurso histórico até chegar àquelas utilizadas atualmente.

2.1.1 As cartas solares

Os primeiros estudos no campo da luz natural e sua interação com as edificações baseiam-se na determinação de insolação de fachadas e projeções de sombras. Atkinson (1912), em seu livro *The Orientation of Buildings*, dá os primeiros passos para o estudo de insolação de fachadas utilizando um método gráfico de projeções da trajetória aparente do céu, as cartas solares, como mostrado na Figura 2.

Tais ferramentas foram sendo aperfeiçoadas ao longo do tempo e deram origem ao método gráfico para cálculo do FLD, uma das métricas de avaliação de desempenho de ambientes. Mesmo diante de tal contexto a carta solar continua sendo uma importante ferramenta de estudo de insolação em edificações tendo em vista sua praticidade e a fácil aquisição de dados através dela.

Figura 2 - Trajetória aparente do sol para a latitude de 42° em projeção plana e em perspectiva.



Fonte: ATKINSON, 1912

Autores como Frota (2004) e Bittencourt (2015)¹ continuam explorando as potencialidades da carta solar como forma de auxílio no dimensionamento de protetores solares, predição de posição solar, cálculo de máscara de sombra, projeção de sombras em edificações e períodos de insolação de fachadas. Bittencourt (2015) define a carta solar como a representação gráfica do percurso do sol na abóbada celeste da terra nos diferentes períodos do dia e do ano, representadas em um plano de referência, sendo confeccionadas em função da latitude.

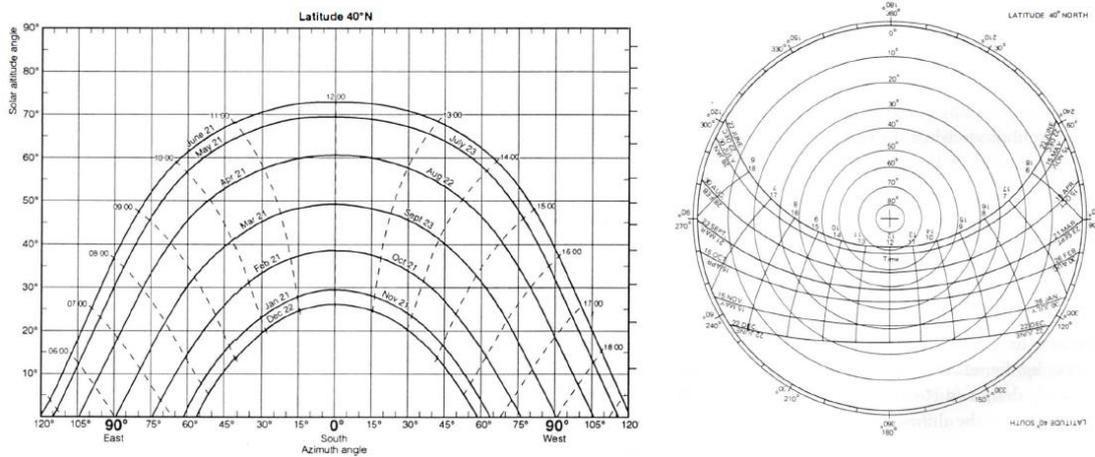
A partir da carta solar é possível definir a altura solar e o azimute para qualquer dia e hora do ano com o auxílio de um transferidor. Existem diversos tipos de cartas solares, diferenciando-se pela projeção de representação (BAKER; STEEMERS, 2002). A mais comum para estudo nos trópicos é a plana estereográfica, entretanto existem outras como a ortográfica horizontal, equidistante horizontal, estereográfica horizontal, cilíndrica ou a gnomônica horizontal (CIAMPINI, 2005), comumente utilizada em relógios de sol. Exemplos das projeções cilíndrica e plana estereográfica são apresentados na Figura 3.

Alguns softwares foram desenvolvidos para auxiliar na utilização da carta solar e estão disponíveis gratuitamente. O Sol-Ar (MACIEL; ONO; LAMBERTS, 2007) permite calcular dimensões de protetores solares para uma orientação de fachada definida, já o TropSolar

¹ O Livro 'Uso das cartas solares: diretrizes para arquitetos' de Leonardo Bittencourt é anterior ao livro da autora Anésia Frota, denominado 'Manual de Conforto Térmico'. A edição atual do livro de Bittencourt é a 5ª, lançada em 2015, a anterior, 4ª, foi lançada em 2004, e a primeira edição em 1996.

(CABUS, 2015) possibilita o cálculo da posição solar e de características como duração do dia e períodos de crepúsculo.

Figura 3 - Exemplo de cartas solares em projeção cilíndrica e plana estereográfica, respectivamente, para a latitude de 40°.



Fonte: BAKER; STEEMERS, 2002

2.1.2 Modelos físicos em escala

Outra metodologia para compreensão da interação entre o sol e a edificação é a utilização de modelos em escala, seja em céu real ou artificial. Walsh (1961) aponta que um dos parâmetros mais importantes para a definição do modelo é a escala. O autor afirma que modelos muito pequenos são difíceis de serem feitos e manipulados e que a utilização de sensores para leitura de resultados é bastante restrita, enquanto modelos muito grandes podem dificultar o transporte e a utilização desse em equipamentos como o heliodon. O autor recomenda ainda que sejam utilizadas escalas de redução de 1:10 a 1:20, a depender do tamanho do equipamento de análise.

A utilização de modelos em escala pressupõe submetê-los a condições de céu, real ou artificial, para sua análise. Uma das primeiras tentativas para simular a posição aparente do sol foi feita por Marks e Woodwell (1914) utilizando um aparato formado por uma malha de fios rígidos que marcavam a trajetória do sol para uma determinada latitude, como mostrado na Figura 4. O dispositivo permitia o estudo para qualquer época do ano, admitindo o ajuste da latitude apenas inclinando a trajetória solar.

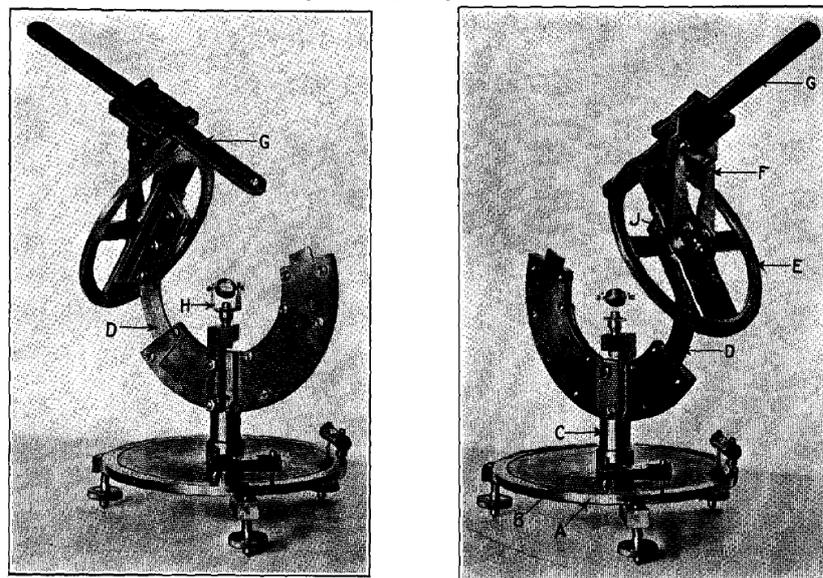
Figura 4 - Modelo em escala de uma edificação com o elemento de estudo da trajetória solar desenvolvido por Marks e Woodwell montado para determinar a direção do raio de sol no solstício de inverno.



Fonte: MARKS; WOODWELL, 1914

Na mesma época, Woodwell desenvolve um aparelho que utiliza uma pequena lâmpada para marcar a posição da projeção solar. O aparelho é apresentado na Figura 5 e foi desenvolvido segundo os mesmos princípios do anterior, entretanto, permite o ajuste para latitudes de 0 a 60°. Ele consiste em uma base para determinação do azimute (A e B da Figura 5) e de um suporte semicircular (D) para ajuste da altura solar. Um segundo suporte (E) permite o ajuste da hora do dia, onde está fixo um braço oco (G) por onde um feixe de luz, natural ou artificial, pode ser direcionado ao modelo estudado. (MARKS; WOODWELL, 1914).

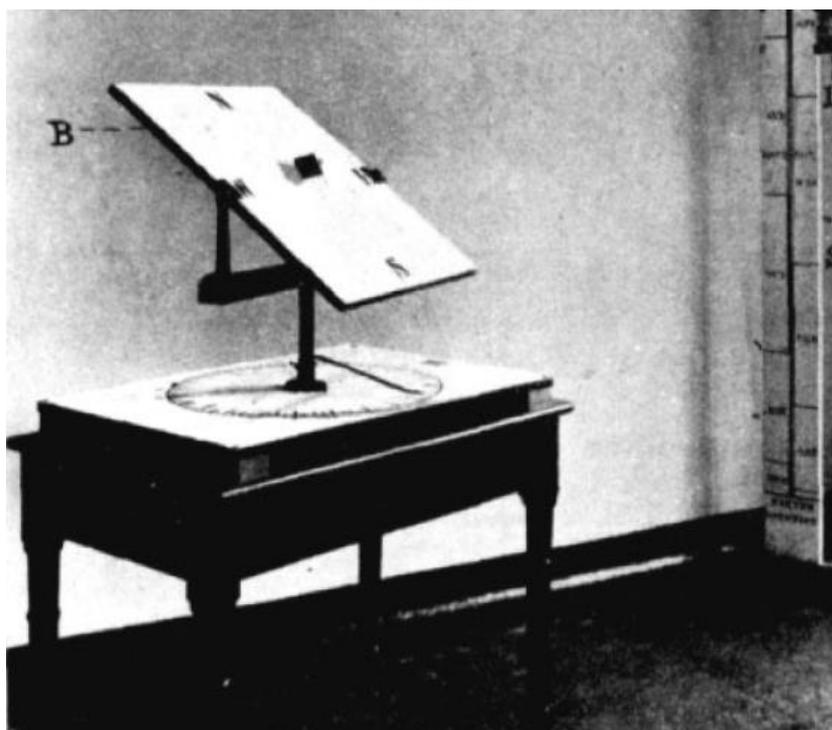
Figura 5 - Aparelho para determinação da posição solar desenvolvido por Woodwell (1914)



Fonte: MARKS; WOODWELL, 1914

A complexidade do aparelho fez com que ele não se popularizasse tanto quanto um outro, desenvolvido alguns anos depois e denominado de Heliodon. O aparelho foi desenvolvido por Dufton e Beckett (1932) e consiste em uma mesa onde se fixa o modelo da edificação, a mesa permite a rotação para ajuste do azimute e angulação vertical para ajuste da altura solar. A fonte luminosa artificial permanece fixa e direcionada para o modelo, permitindo o estudo de insolação e sombras. O modelo original é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Modelo original do heliodon desenvolvido por Dufton e Beckett. O plano B representa a superfície terrestre e pode ser rotacionada para representar a posição aparente do sol na abóbada.



Fonte: DUFTON; BECKETT, 1932

Diversos modelos foram desenvolvidos posteriormente, nesses a mesa permanece fixa ou que a posição da lâmpada pode ser alterada conforme o dia do ano. Este mecanismo, por sua facilidade de utilização e de observação dos resultados, é amplamente utilizado didaticamente para fins de compreensão da trajetória solar e de sua influência no sombreamento e na insolação de fachadas em edificações (ZAMBRANO *et al.*, 2014).

Outros aparelhos também podem ser utilizados para simular toda a abóbada celeste, como sistemas de céu artificial utilizando lâmpadas. Comumente estas ferramentas utilizam a divisão de céu proposta pela CIE de 145 setores. (CIE, 2002). Alguns modelos, entretanto, utilizam superfícies difusas para simular condições de céu com distribuição uniforme, como mostrado na Figura 7. Existem sistemas para simulação de céu de forma artificial de diversas dimensões, um dos maiores é o existente no *Research Institute for Building Physics*, em Moscou, com uma

cúpula de 16,8 metros de diâmetro, contendo 736 lâmpadas em um hemisfério completo (LIOUTSKO; SPIRIDONOV, 1991).

Figura 7 - Análise da disponibilidade de luz natural em modelo utilizando um céu artificial no laboratório da Bartenbach, na cidade de Munique, Alemanha



Fonte: SITECO, 2012

Alguns autores indicam que a utilização de modelos em escala para quantificação da luz natural no plano de trabalho pode ter uma diferença de até 20%, para mais ou para menos, em relação à edificação real, fruto da simplificação das condições de entorno, das características internas e da precisão do céu artificial (BROKES, 1997). Autores como Castanho (2007) apontam que a falha na calibração do céu artificial pode gerar discrepâncias nos resultados para iluminância, mas se analisados outros aspectos, como o fator de luz do dia, essa variação chega a no máximo 7%.

Os modelos em escala podem ser utilizados também em estudos utilizando céus reais. Ciampini (2005) realizou um amplo estudo da aplicação de diversos elementos avançados em iluminação natural com modelos em escala em condições de céu real para a cidade de Campinas, em São Paulo, cujo modelo físico é mostrado na Figura 8. A autora aponta que alguns elementos avançados não eram possíveis de serem feitos em escala, devido ao processo de manufatura, o que limita a validade do modelo, entretanto, os testes obtiveram importantes resultados quantitativos, utilizando um sistema de aquisição de dados, e qualitativos através de fotografias internas. A autora ressalta ainda a importância da calibração dos sensores de

aquisição de dados e do cuidado com a degradação dos mesmos por estarem expostos durante longos períodos de tempo a radiação solar direta.

Figura 8 - Modelo em escala de uma edificação utilizado para o estudo sob condições de céu real



Fonte: CIAMPINI, 2005

2.1.3 Modelos matemáticos de céu

Os primeiros estudos sobre distribuição de luminâncias do céu foram feitos por Kimball e Hand (1922) durante 3 anos, que resultaram em modelos para céu claro e encoberto para as cidades de Chicago e Washington, nos EUA. Em 1929 Pokrowski propõe algumas alterações no modelo com a inserção de um céu claro com nuvens e dos efeitos de refração atmosférica (MUNEER, 2004).

Em 1942 Moon e Spencer propõem uma fórmula empírica para representação da luminância em um céu encoberto (HOPKINSON, 1963), que foi adotada, em 1955, como o céu encoberto padrão da CIE. Anos depois Kittler propõe uma formulação para céu claro, que será também incorporada como distribuição padrão da CIE em 1965 (KITTLER, 1967). Inicialmente tais modelos eram utilizados associados a métodos de cálculo da iluminância ou do fator de luz do dia, de forma gráfica ou matemática e posteriormente foram incorporados aos softwares de simulação em iluminação natural. Outros modelos de céu foram desenvolvidos e reunidos no que compõe os 15 tipos de céu padrão determinados pela CIE (CIE, 2002), conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos tipos de céu proposta pela CIE.

Tipo	Descrição	Tipo	Descrição
1	Céu encoberto - Gradação de luminâncias íngremes em função da altura solar e uniformidade azimutal	9	Parcialmente encoberto - com obstrução
2	Encoberto - Gradação de luminâncias íngremes em função da altura solar e brilho moderado ao redor do sol	10	Parcialmente encoberto - com uma região circumsolar brilhosa
3	Encoberto - Gradação de luminâncias moderada com uniformidade azimutal	11	Céu branco-azul com coroa solar distinta
4	Encoberto - Gradação de luminâncias moderada e brilho moderado ao redor do sol	12	CIE Padrão de Céu claro com baixa turbidez
5	Céu de luminâncias uniformes	13	CIE Padrão de Céu claro com atmosfera poluída
6	Parcialmente encoberto - Sem gradação em função da altura solar com brilho moderado ao redor do sol	14	Céu túrbido sem nuvens com ampla coroa solar
7	Parcialmente encoberto - Sem gradação em função da altura solar e com uma região circumsolar brilhosa	15	Céu branco-azul túrbido com ampla coroa solar
8	Parcialmente encoberto - Sem gradação em função da altura solar e com uma coroa solar distinta		

Fonte: Adaptado: CIE, 2002

Os softwares de simulação em iluminação normalmente utilizam dois tipos de modelagem de céu: o conjunto de 15 tipos de céu descritos pelas CIE (CIE, 2002) ou Céu de Perez (*The Perez All-Weather Sky Model*) (PEREZ; SEALS; MICHALSKY, 1993), que é um modelo matemático usado para descrever a distribuição relativa de luminâncias da abóbada celeste, assim como os modelos da CIE, porém, utilizando dados de estações meteorológicas para a sua definição. Tregenza e Sharples (1993) sistematizaram diversas formulações já existentes e novas sobre modelagem de céu e algumas formulações adicionais para tratar de turbidez local, poluição do ar e intensidade dos raios solares devido à posição do sol em relação ao ponto de análise.

2.1.4 A simulação computacional

O uso da simulação computacional na arquitetura, principalmente nas áreas ligadas ao conforto ambiental, tem tido grande destaque nos âmbitos de pesquisa e projeto. A previsão de utilização dessas ferramentas pelos normativos de desempenho nacionais (ABNT, 2013b) e internacionais (IES, 2012) de certificação ambiental das edificações tem sido um estímulo para que os profissionais da área passem a conhecer e dominar seu uso.

As ferramentas de simulação permitem dar suporte adequado às práticas projetuais da arquitetura, proporcionando a retroalimentação de informações nas diversas fases de tomada de

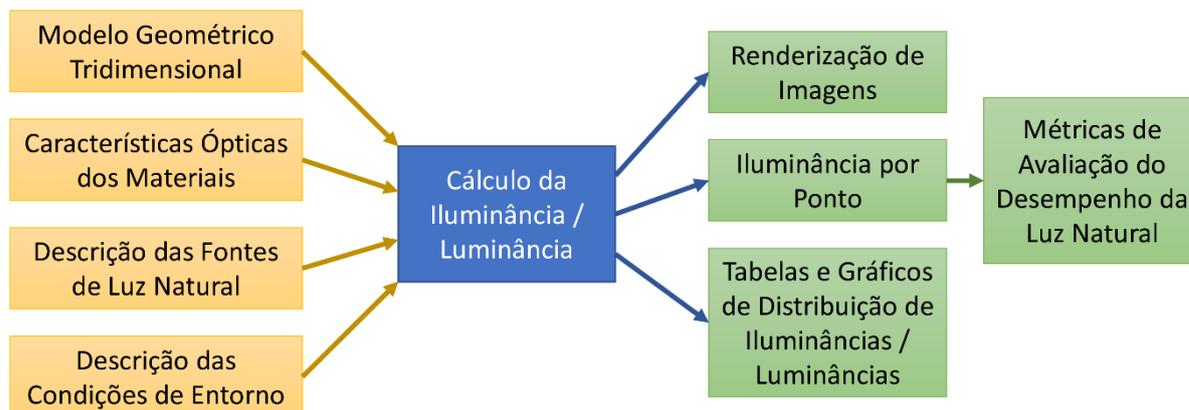
decisão, avaliando os impactos das soluções antes que estas estejam realizadas fisicamente (ANDRADE; RUSCHEL; MOREIRA, 2011). Autores como Ratti, Baker e Steemers (2005) apontam que, mesmo com a grande disponibilidade de softwares para tais tarefas, a incorporação desses nos escritórios de arquitetura ainda não é algo comum, tendo em vista a complexidade das ferramentas e a os custos computacionais que uma escolha errada pode gerar.

A grande diversidade de softwares encontrados faz com que muitas vezes o usuário não disponha de critérios suficientes para escolhê-los. Associado a isso, a ampla gama de resultados faz com que as ferramentas requeiram um custo computacional alto e que, por vezes, não atendam aos anseios dos profissionais que desejam resultados específicos. Nesse sentido o hiato entre pesquisadores, desenvolvedores e os escritórios de arquitetura ainda existe. Freire e Amorim (2011) afirmam que a grande maioria das ferramentas de simulação está distante do cotidiano de escritórios de arquitetura, sendo seu uso ainda restrito a academia e a especialistas do setor. Os autores justificam esse cenário por uma resistência dos projetistas em utilizar ferramentas de avaliação de desempenho, especificamente aquelas que tratam demasiadamente de valores numéricos.

As metodologias utilizadas para a simulação permitem que os softwares gerem visualizações em 3 dimensões, com apresentação da iluminância através de imagens em falsa cor ou em objetos animados, entretanto, tais resultados limitam-se a análise qualitativa, enquanto que softwares que fornecem resultados numéricos de iluminância simplesmente são mais importantes para uma análise quantitativa. Mesmo diante de tais diferenças há algumas características que são comuns a todos os softwares e alguns tipos de resultados que são básicos em qualquer análise. A Figura 9 apresenta um fluxograma simples de entrada e saída de dados válidos para a maioria dos softwares, com particularidades principalmente na saída de dados.

Os dados inseridos nos softwares para geração do modelo computacional comumente são os mesmos, entretanto, o tratamento dado a eles é diferente. Programas que se utilizam da radiosidade normalmente necessitam que as superfícies passem por um processo de discretização, reduzindo grandes elementos a pedaços que serão estudados separadamente, o que não acontece nos softwares que utilizam a metodologia do raio traçado. As demais características, como propriedades ópticas dos materiais, são inseridas posteriormente, associadas a cada elemento ou plano. Ainda é possível gerar geometrias complexas, com a inclusão de elementos de entorno.

Figura 9 - Fluxograma dos elementos de entrada e saída envolvidos na simulação computacional da luz natural.



Fonte: Elaborado pelo autor

Duas metodologias de cálculo são comumente encontradas nos softwares de iluminação natural e artificial para calcular a iluminância e a luminância dos ambientes com precisão: a radiosidade e o raio traçado ou a combinação de ambos, utilizada em alguns programas. Alguns programas utilizam-se ainda de métodos simplificados, mas são menos comuns. Os resultados disponibilizados pelo raio traçado normalmente apresentam uma vantagem em relação ao tempo de processamento, enquanto que a radiosidade mostra-se mais eficiente na elaboração de visualização por imagens, entretanto, todas essas vantagens estão relacionadas a situações específicas de simulação, como determinadas características da geometria, materiais e métricas calculadas.

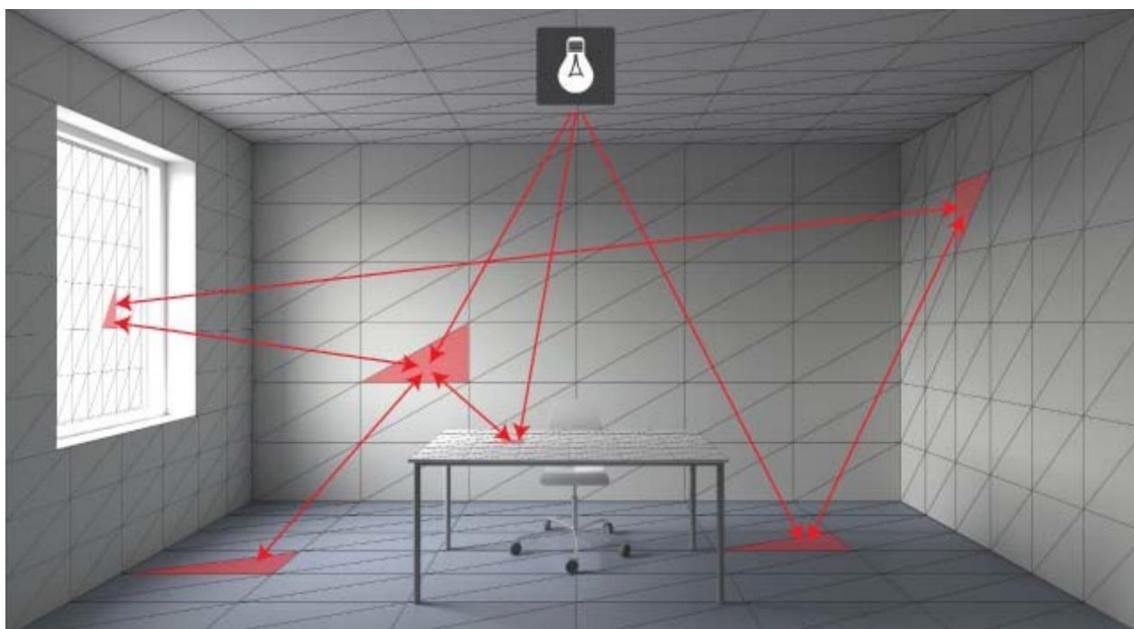
2.1.4.1 Método da radiosidade

Um dos principais métodos utilizados pelos programas de simulação em iluminação natural é o da radiosidade, que deriva de conceitos de transmissão de calor e energia entre superfícies adaptados pela computação gráfica para quantificação da luz (LOPES, 2009). Em aplicações na iluminação natural a troca energética é convertida em troca luminosa entre superfícies perfeitamente difusas e geralmente é tratada por métodos de elementos finitos (CLARO, 1998).

Para o cálculo utiliza-se o conceito de fator de forma, que é a fração de radiação que deixa um elemento de superfície finita e atinge outro diferente (TREGENZA, 1993). Um exemplo de discretização de superfícies é apresentado na Figura 10. O método surge com Cohen *et al.* (1988) que propõe o uso das formulações apresentadas por Siegel e Howell (1971) para trocas energéticas entre superfícies e implementadas computacionalmente por Goral *et al.* (1984). As fórmulas para cálculo do fator de forma entre superfícies simples estão definidas por Siegel e Howell (1971) e podem ser aplicadas a modelos simplificados. Para modelos com maior

complexidade de planos os cálculos do fator de forma incluem integrais múltiplas, o que onera o custo computacional da utilização do método.

Figura 10 - Exemplo e discretização de planos para o cálculo do fator de forma utilizado no método da radiosidade.



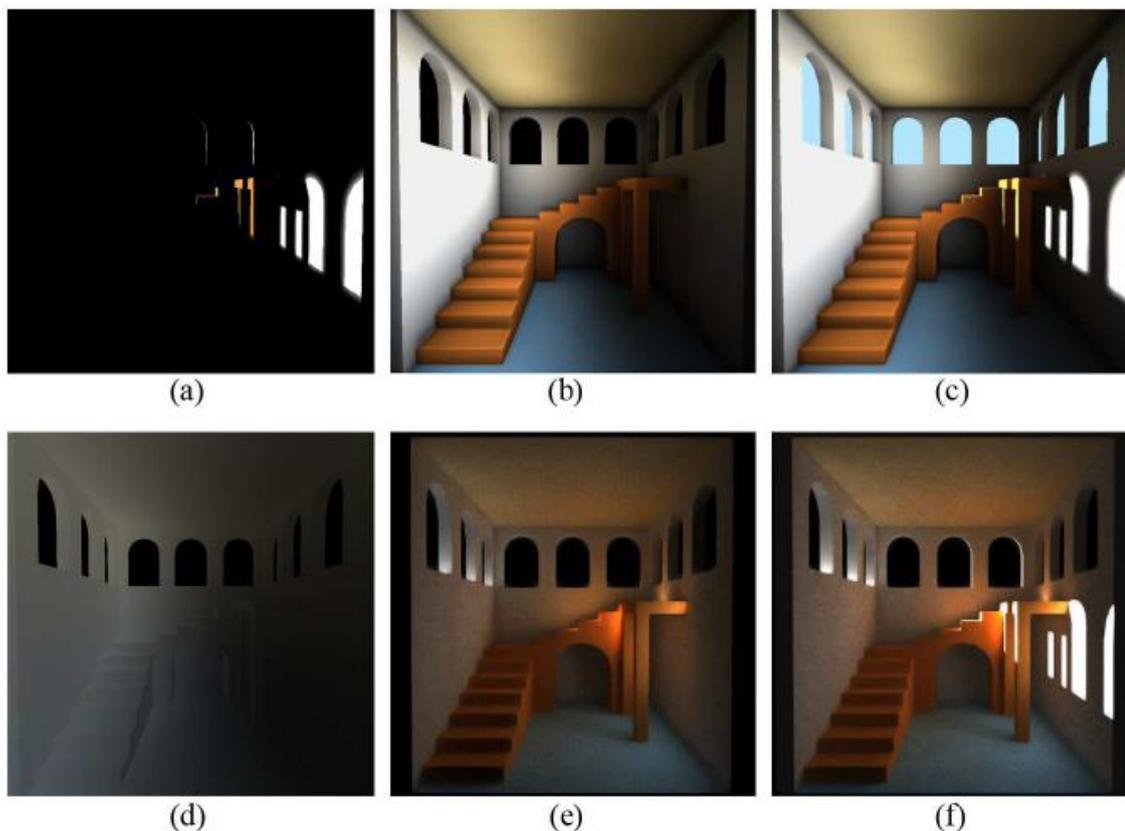
Fonte: IVERSEN, 2013

A utilização do método da radiosidade para o cálculo da iluminância no plano de trabalho exige que o software processe diversas vezes os valores de luminância para cada fator de forma a fim de computar todas as fontes de luz existentes. Um exemplo é visto na Figura 11. A composição final dos dados é fruto de um conjunto de processamentos de radiosidade e coeficientes de forma (GAITATZES; MAVRIDIS; PAPAIOANNOU, 2010).

Os pontos positivos do método são a capacidade de simular interreflexões com precisão e a possibilidade de gerar imagens, com dados de luminância ou iluminância, independente do ponto de vista do observador (CARVALHO, 2009). Por outro lado, ele possui dificuldade em processar geometrias complexas, consequência da grande demanda de processamento com o aumento no volume de transmissões energéticas entre setores, e limitações em abordar transparência e colisão especular.

Um dos pontos de maior limitação é a variação de tipo de céu, hora e orientação. Os normativos modernos preveem a determinação da iluminância de forma anualizada, o que requer das ferramentas com flexibilidade em calcular de forma rápida tão grande quantidade de eventos. O método da radiosidade, pelo grande volume de processamentos, demanda muito tempo para processar tais modelos utilizando os computadores atuais.

Figura 11 - Sequência para composição de imagem a partir do método da radiosidade: (a) Ambiente apenas com luz direta. (b) Ambiente depois de processada a radiosidade 64 vezes. (c) Inserção da iluminação nas aberturas. (d) Iluminação indireta utilizando a reflexão entre volumes internos. (e) Composição final sem iluminação direta. (f) Imagem Final.



Fonte: GAITATZES; MAVRIDIS; PAPAIOANNOU, 2010

Alguns softwares de simulação em iluminação utilizam o método da radiosidade, como o Radiance^{®2} e o Apolux, esse último desenvolvido por Claro (1998), outros permitem ainda a integração de iluminação natural e artificial, como o último citado e o Dialux.

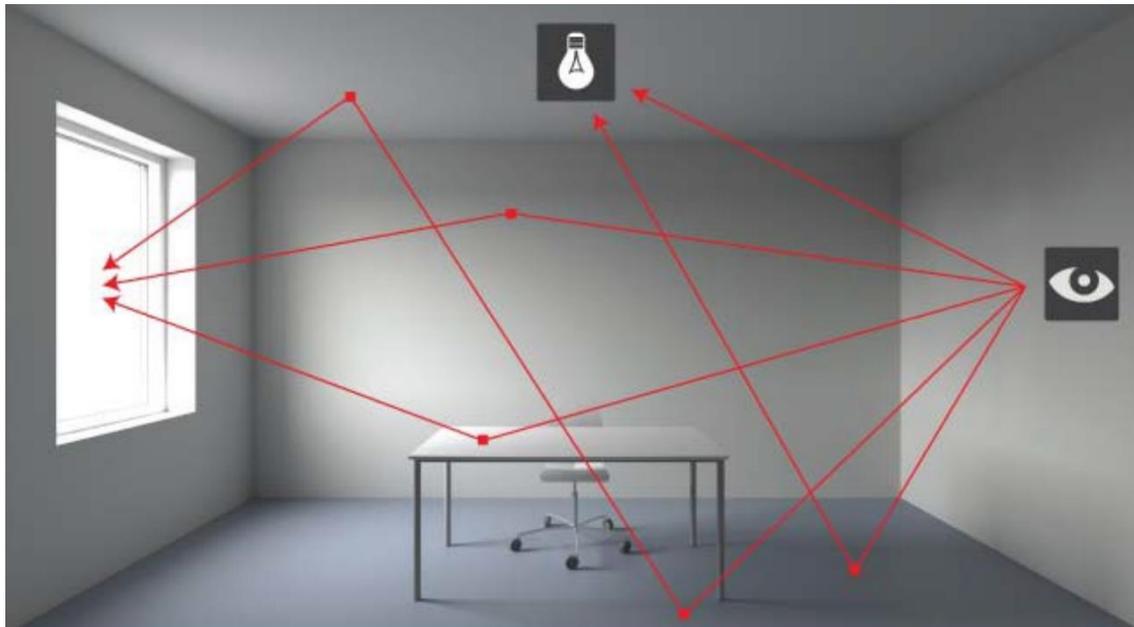
2.1.4.2 Método do raio traçado (*Ray Tracing*)

A técnica do raio traçado, ou *ray tracing*, surge na computação gráfica como forma de obter imagens de objetos modelados computacionalmente. Glassner (1989) explica que para a formação da imagem alguns elementos são necessários: um ponto de origem (ou ponto de vista do observador), um plano de visão entre o observador e o objeto, que servirá como um filme de luz, e por último o objeto ao qual os raios são direcionados. Os raios emitidos podem ter duas direções, da fonte para o observador, o *forward ray tracing*, ou do observador em direção à

² O software Radiance utiliza prioritariamente o método do raio traçado, mas também o método da radiosidade.

fonte, o *backward ray tracing*. Um exemplo dessas interações entre os raios e as superfícies é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Possibilidades de interações entre o raio e as superfícies no método do raio traçado.



Fonte: IVERSEN, 2013

O processamento de imagens utilizando o Raio Traçado independe do tipo da fonte de luz, logo pode ser aplicado em programas de cálculo da iluminação natural e artificial. Cabús (2005) aponta alguns pontos positivos do método, como a facilidade em lidar com geometrias complexas e com o fenômeno da colisão especular. Entretanto, quando tratados materiais difusos, o processamento computacional demanda muito tempo, o que pode ser solucionado com o auxílio de outros métodos, como o método Monte Carlo. Alguns softwares, a exemplo do TropLux, desenvolvido por Cabús (2002), utilizam-se do raio traçado, combinado a outras ferramentas, para calcular a disponibilidade de luz natural nos ambientes internos. Softwares como o Radiance® e o DaySim possuem alguns módulos que combinam as duas metodologias de cálculo para gerar dados quantitativos e qualitativos.

É possível ainda combinar o método do raio traçado de forma bidirecional, denominado de método do mapeamento de fótons. Esse método permite que sejam simuladas situações de iluminação com maior precisão, sendo, em alguns casos, mais rápida que o *backward ray tracing* (IVERSEN, 2013).

2.1.4.3 O software TropLux

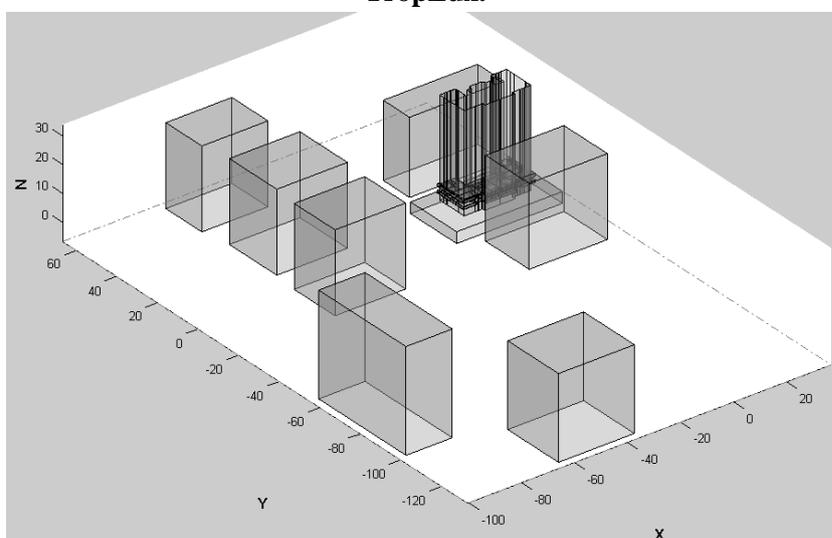
O software de simulação em iluminação natural TropLux foi desenvolvido por Cabús (2002) durante seu doutorado e é atualizado e aprimorado pelo Grupo de Pesquisa em

Iluminação da Universidade Federal de Alagoas. Para seu funcionamento utiliza os princípios do raio traçado associado aos coeficientes de luz natural (TREGENZA; WATERS, 1983) e o método Monte Carlo aplicado à iluminação natural (TREGENZA, 1983). Seu desenvolvimento utiliza como base a linguagem MatLab®, utilizando-se da interface gráfica do próprio programa no ambiente de trabalho do usuário (CABÚS, 2005)

O TropLux tem sido utilizado em trabalhos científicos como teses nacionais (LARANJA, 2010; CARVALHO, 2018) e internacionais (HAREDY, 2016), dissertações (SOTO, 2010; NETTO, 2015), artigos em congressos nacionais (PASSOS; LAMENHA; CABÚS, 2014) e internacionais (CORREIA; CABÚS; ARAÚJO, 2008) e em revistas nacionais (MENDES *et al.*, 2005; RIBEIRO; CABUS, 2019) e internacionais (RAMOS; GHISI, 2010). O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ-R (BRASIL, 2012), também cita o TropLux como um dos programas indicados para avaliação do desempenho quanto à iluminação natural para o cálculo do nível de eficiência energética em habitações.

Para determinação do modelo computacional o usuário deve informar os planos retangulares, definidos pelas coordenadas de seus vértices, que compõem a geometria. Posteriormente são definidas as características como refletância e transmitância. A combinação de diversos planos permite a geração de geometrias complexas em modelos de ambientes internos e cenários urbanos. Um exemplo de geometria é apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Exemplo de geometria complexa de uma quadra residencial processada utilizando o TropLux.

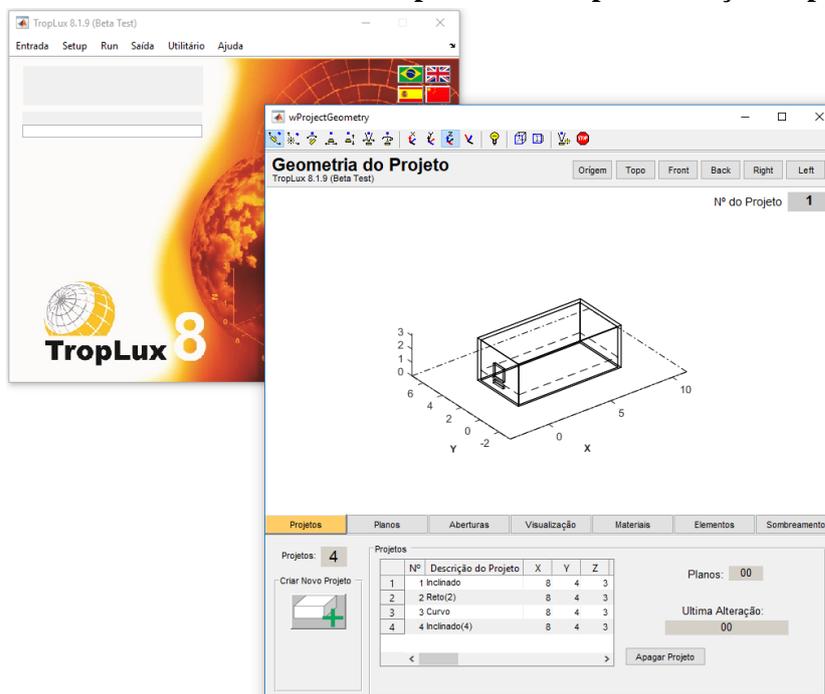


Fonte: Elaborada pelo autor

Uma função importante do programa, que o habilita para a simulação das novas métricas de avaliação de desempenho é o Céu com Distribuição Dinâmica de Luminâncias (DDL). O

CDDL escolhe um dos tipos de céu CIE (2002), de acordo com sua probabilidade, no dia e na hora calculados, usando os estudos de Cabús (2002) e de Manhas (2016), estando presente no software de simulação TropLux. A versão mais recente do programa até a redação da tese é a TropLux 8, lançada em 2019 e mostrada na Figura 14.

Figura 14 - Interface do Software TropLux 8 - Tela para inserção de projetos



Fonte: Elaborada pelo autor

O processamento da iluminância acontece em três etapas distintas: inicialmente são calculados os coeficientes de luz natural diretos; posteriormente são calculados os coeficientes refletidos, em que o método Monte Carlo é aplicado para definir a trajetória do raio e sua interação com os demais elementos do modelo; por último é calculada a iluminância para as orientações de modelo, dia e hora, previstos pelo usuário. Essa metodologia faz com que várias configurações de dias, horas, orientações e tipos de céu sejam processadas com rapidez, utilizando os mesmos coeficientes previamente calculados, reduzindo o custo computacional de processamentos em lote.

A metodologia adotada pelo TropLux para o cálculo da iluminância permite dividi-la pelas fontes de luz, céu e sol, e pela forma como o raio interage com as superfícies, direta e refletida. Essa divisão permite que o programa gere coeficientes de luz natural independentes para a componente direta e refletida. Para o cálculo da componente refletida é utilizada a divisão de céu em 145 partes proposta pela CIE (CIE, 2002), já para a componente refletida a divisão com 5221 partes proposta por Cabús (2002). Dividir os coeficientes em direto e refletido é uma potencialidade do TropLux que será explorada em algumas etapas dessa pesquisa.

2.2 Métricas de avaliação do desempenho da luz natural

Os métodos de cálculo da iluminância permitem a determinação da quantidade de luz que chega no plano de trabalho a cada instante, entretanto, apenas o valor absoluto da iluminância é insuficiente para determinar se um ambiente é eficiente. Para permitir que o ambiente pudesse ser avaliado de forma mais específica, possibilitando inclusive a comparação entre diferentes estratégias de tratamento da luz natural, é que surgem as métricas. Posteriormente, serão incorporados conceitos relacionados à eficiência energética das edificações e as métricas desenvolvidas nesse período permitem, associadas a outros estudos, a quantificação do ganho energético da edificação.

2.2.1 Fator de luz do dia (FLD)

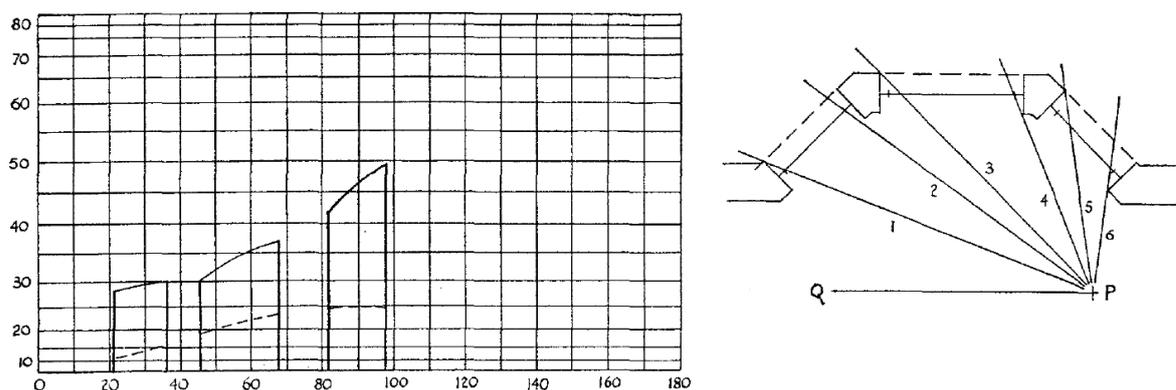
O Fator de Luz do Dia (FLD), ou *Daylight Factor (DF)*, é a primeira métrica de avaliação do desempenho da luz natural em edificações. Foi introduzida em 1895 por Trotter como um dos indicadores de desempenho das edificações (TROTTER, 1911) e descrita por Hopkinson (1963) como a razão entre a iluminância interna e externa no mesmo instante, em que a externa é obtida em situação de céu encoberto desobstruído. O cálculo do FLD é resultado de três elementos: a componente de céu (CC), a componente refletida externa (CRE) e a componente refletida interna (CRI).

O valor da iluminância externa deverá ser obtido em uma situação onde a abóbada celeste é desobstruída e para céu encoberto padrão CIE (MOON, SPENCER, 1942). As primeiras abordagens utilizando o FLD admitiam a utilização de um valor fixo de iluminância externa, típico do Reino Unido, de 500 lm/sq.ft, inclusive alguns laboratórios forneciam tabelas com o cálculo da quantidade de horas atendidas por valores de FLD, como a do *National Physical Laboratory em Seasonal Variation of Daylight Illumination* (NPL, 1935 *apud* HOPKINSON, 1963). Em outros casos os laboratórios vinculados às estações meteorológicas emitiam boletins com valores de iluminância externa e, em situações específicas, diagramas de distribuição de brilho do céu (PETHERBRIDGE, 1954).

Diversos métodos foram desenvolvidos para o cálculo do FLD, sendo classificados em duas categorias: a primeira, daqueles que utilizam fórmulas, tabelas ou diagramas e a segunda, dos que utilizam métodos gráficos (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1966). Também é possível classificá-los quanto a forma de cálculo em dois tipos: componentes calculadas separadamente e cálculo unificado (HOPKINSON, 1963).

Dentre os métodos gráficos utilizados para o cálculo do FLD destacam-se o de Waldram, que calculava apenas a componente de céu (CC). Desenvolvido por Waldram, P. J. e seu filho Waldram, J. M. em 1923, consiste em uma malha representando a elevação solar e o azimute, para um quarto de esfera, em que se desenha com auxílio de transferidores, a parcela de céu visível de um ponto. Posteriormente verifica-se as áreas de céu que influenciam na iluminação do ponto e determina-se a CC, como mostrado na Figura 15 (WALSH, 1961). Inicialmente o valor da CC era dado para um céu de luminância uniforme, posteriormente foi incorporado também o céu encoberto da CIE (WALSH, 1959 apud WALSH, 1961).

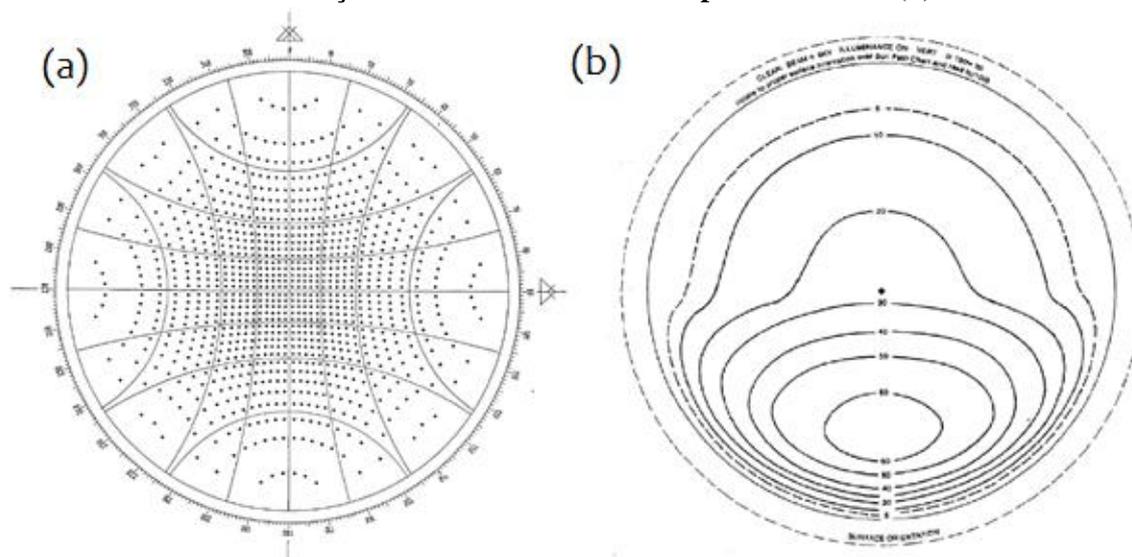
Figura 15 - Exemplo da aplicação do Diagrama de Waldram para uma janela simples do tipo *Bay Window*



Fonte: WALSH, 1961

Outro tipo de método gráfico é o de Pleijel, G., desenvolvido em 1954 (PLEIJEL, 1954), utilizado para o cálculo da CC no céu de distribuição uniforme da CIE. O método utiliza um diagrama de pontos em uma projeção de hemisfério, a quantidade de pontos visíveis relaciona-se com a CC, como mostrado na Figura 16. Uma derivação do método foi desenvolvida por Turner em 1969 (TURNER, 1969 apud MOORE, 1991), em que a distribuição dos pontos passa a ser em função da luminância do céu e não da influência do setor, como no de Pleijel. Posteriormente o método foi sendo ampliado em diagramas de contorno, como no de Millet (1978), chamado de *Graphic Daylight Design Method (GDDM)*, inicialmente utilizado em céu encoberto CIE, mas ampliado para céu claro (MILLET *et al.*, 1980 apud MOORE, 1991).

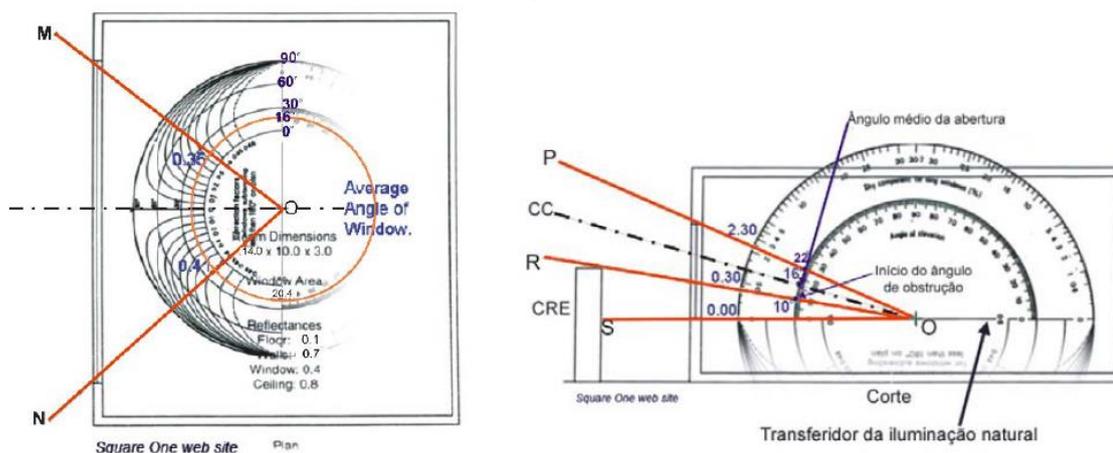
Figura 16 - Diagrama de pontos de Pleijel para um céu encoberto (a) e um diagrama de distribuição de luminâncias de Millet para céu Claro (b)



Fonte: (a) PLEIJEL, 1954 e (b) MOORE, 1991

Outros métodos utilizavam tabelas, associadas à geometria da abertura, para definir diretamente o valor do FLD. Um deles é o método desenvolvido por Dufton em 1946 (MOORE, 1991) para o *Building Research Establishment (BRE)* denominados de *Building Research Station Protractors (BRS Protractors)*, que se vale do ângulo sólido projetado para definir a CC e a CRE, como mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Exemplo de aplicação dos transferidores do método BRS

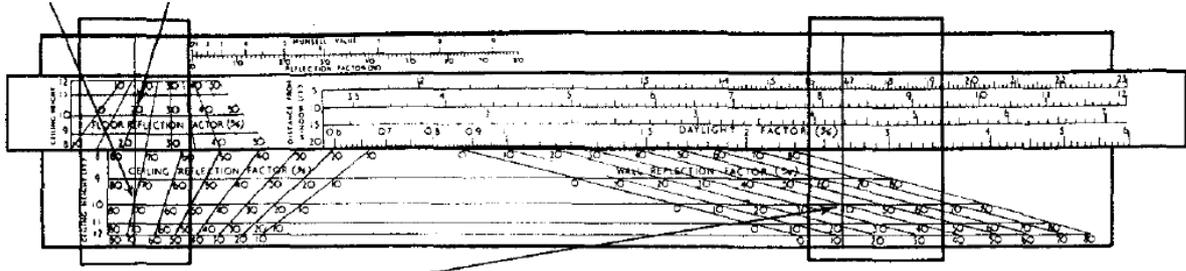


Fonte: PEREIRA, 2006

Outros métodos desenvolvidos utilizavam-se de tabelas para o cálculo da CC a partir de parâmetros do ambiente, como as tabelas NPL, para céu uniforme e as tabelas de Rivero, para céu uniforme e encoberto padrão CIE (MOORE, 1991). Importante observar que algumas metodologias permitiam o cálculo do FLD de forma direta, em um único passo, a exemplo da régua de cálculo de FLD, desenvolvida pela BRS. O cálculo baseia-se na refletância das

paredes, nas dimensões do ambiente e da distância do ponto à janela, como mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Régua para o cálculo do Fator de Luz do Dia da BRS



Fonte: MOORE, 1991

Para definição da CRI faz-se necessária a utilização de um método complementar, como os nomogramas desenvolvidos pela BRE (MOORE, 1991), que foi posteriormente ampliado por Bryan e Clasberg (1982 apud MOORE, 1991) para céu claro. Uma das limitações do método BRE é que ele se limita a aberturas laterais, em condições específicas de altura e largura, entretanto, possui a vantagem de obter mais de uma componente em um único método.

Alguns métodos matemáticos foram desenvolvidos para o cálculo do FLD sem a necessidade de ferramentas gráficas. Um dos primeiros é proposto por Fruehling em 1928 (DRESLER, 1954), em que a formulação é apresentada na equação 1.

$$DF_{av} = \frac{E_{av}}{E_{ex}} = f * \eta * \frac{A_w}{A_F} \quad (1)$$

Onde E_{av} é a iluminância média no plano de trabalho, E_{ex} é a iluminância horizontal externa sob céu uniforme, f é um fator de abertura que relaciona a iluminância vertical que chega à janela e a que atinge o plano de trabalho, η é o coeficiente de utilização da janela, A_w é a área da janela e A_F a área de piso (DRESLER, 1954). Esse método será chamado posteriormente de método dos lúmens, amplamente utilizado para cálculos em iluminação artificial (MOORE, 1991). Outra dedução importante é apresentada por Hopkinson (1963) para o cálculo do fator de Céu (SF), mostrada na equação 2.

$$SF = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi = \frac{\varphi}{4} (1 - \cos(2\theta)) \quad (2)$$

Em que θ é a elevação em relação ao plano vertical e φ é o azimute. A fórmula apresentada é a base para os diagramas de Waldram, utilizados para o cálculo da CC em condições de céu uniforme (HOPKINSON, 1963).

A componente refletida interna nas fórmulas empíricas sempre foi uma questão de difícil resolução, tendo em vista a complexidade das interreflexões no ambiente. Em 1954, Hopkinson, Petherbridge e Longmore propõem uma metodologia baseada na formulação de Arndt, que em 1953 foi utilizada para criação do método BRS, denominado de *Split-flux*. Esse consiste em dividir o ambiente por um plano horizontal que passa pelo centro do ambiente. A parte superior compreende a luz vinda do céu e das obstruções externas acima do plano e a parte inferior compreende as reflexões no solo e nas obstruções abaixo do plano (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1966). Uma das limitações do método é tratar as obstruções externas como planos de largura infinita, problema que foi corrigido posteriormente por Tregenza (1989) para incluir obstruções verticais altas e elementos de proteção solar.

Importante notar que as fórmulas para cálculo direto do FLD possuem diversas limitações de aplicação, tendo em vista o caráter de simplificação que as pressupõe. Outra questão importante é que a utilização do FLD não é possível para céus com sol visível, o que inviabiliza a sua utilização para diversas situações, principalmente no clima tropical. O cálculo da métrica tornou-se simplificado com o advento das ferramentas computacionais, fazendo com que ele seja utilizado até hoje em normativos nacionais (ABNT, 2013b) e internacionais (CIBSE, 2014; USGBC, 2019), entretanto, por ser uma métrica estática, possui limitações que as métricas anualizadas buscam suprir.

Algumas fórmulas para o cálculo do FLD médio no ambiente, utilizando-se de características geométricas do espaço e propriedades das superfícies, podem ser encontradas na literatura. Uma das mais conhecidas é a de Crisp e Littlefair (1984), que se baseia nas formulações para o cálculo de iluminância definidas por Sumpner (1893) e que é citada pela *IES Lighting Handbook* (IES, 2000), apresentada na equação 3.

$$df = \frac{tA_w\theta}{A(1 - R^2)} \quad (3)$$

Em que t é a transmitância do vidro da janela, A_w é a área da janela, θ é o ângulo de céu visível, A é a área total das superfícies internas e R é a refletância média interna.

2.2.2 Iluminância (E)

A grandeza fotométrica mais utilizada na determinação do desempenho luminoso das edificações é a iluminância. Todas as normas brasileiras relacionadas à iluminação utilizam-na como parâmetro de referência para a avaliação da disponibilidade de luz natural e artificial em ambientes internos. A norma brasileira NBR 15215: Iluminação Natural (ABNT, 2005a; 2005b; 2005c) utiliza a iluminância como parâmetro de avaliação da disponibilidade de luz natural em ambientes construídos. Ela ainda aponta os procedimentos para sua determinação *in loco* ou por meio de simulação computacional. Guidi *et al.* (2018) observam que o procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural descrito não configura uma simulação computacional e sim um método prescritivo. O documento prevê ainda a utilização da iluminância para o cálculo do FLD de ambientes para medição *in loco*. A norma brasileira de desempenho das edificações (ABNT, 2013a) também utiliza a iluminância como parâmetro principal quanto ao desempenho lumínico, permitindo que o valor seja calculado por meio de simulação computacional ou medições *in loco*, para cálculo do FLD.

O cálculo da iluminância é um dado pontual, sendo assim torna-se um parâmetro de difícil comparação e pouco representativo se analisado isoladamente. A norma brasileira para iluminação artificial (ABNT, 2013b) e autores como Boyce (2010) apontam que deve ser calculada a iluminância média no plano de trabalho e que esse valor é o que deverá ser comparado com os requisitos definidos em norma. Autores como Pattini (2000) afirmam que ao longo do tempo os normativos têm se distanciado da definição de um valor global e que as diferenças entre eles, para a mesma tarefa, podem variar em até cinco vezes.

Para iluminação natural diversos autores (GHISI; LAMBERTS, 1997; TREGENZA, 1995; MAIOLI, 2014; TAMIOSSO, 2015) e a norma brasileira (ABNT, 2005c) adotam, com restrições, utilização da média das iluminâncias no plano de trabalho como parâmetro de avaliação do desempenho luminoso. Uma extensão do conceito se aplica a simulações dinâmicas anualizadas, calculando-se a iluminância média anual (EMA) e utilizada em diversos trabalhos, como os de Laranja (2010) e Carvalho (2018).

2.2.3 Uniformidade da luz natural (U)

Na literatura é possível encontrar diversas formas de estudo da variação da iluminância no plano de trabalho. Ferramentas estatísticas como o desvio padrão (CEC, 2012), o coeficiente de variação (CABÚS, 1997; IES, 2000) e razões entre máximo e média ou entre máximo e mínimo (IES, 2011) são utilizadas para avaliar a distribuição da luz natural.

A uniformidade da iluminância, ou *Daylight uniformity ratio* (UR), é definida como a relação entre a iluminância mínima e a média no plano de trabalho (ABNT, 2013a). Esse parâmetro permite avaliar a relação entre a iluminância na área da tarefa e o seu entorno imediato, proporcionando melhoria na avaliação do desempenho lumínico, se comparado apenas ao valor médio global (SLATER; BOYCE, 1990). Phillips (2004) afirma que o aumento da uniformidade deve anteceder outras preocupações como a ocorrência de ofuscamento. Autores como Baker, Fanchiotti e Steemers (1993) apontam-na como uma das componentes indispensáveis na avaliação da qualidade da iluminação natural.

Normas internacionais para iluminação artificial como a *Lighting of indoor workplaces* (ISO, 2002) e a norma brasileira para iluminação artificial em ambientes de trabalho ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013a) propõem como parâmetro obrigatório de análise a uniformidade associada a outros índices. A CIBSE (1999) indica que o uso da iluminância média como parâmetro de desempenho não é efetivo, tendo em vista a variabilidade da luz no plano de trabalho, e propõe a utilização de outras grandezas como a uniformidade. Alguns relatórios técnicos, como a CEC-500-06-039 (CEC, 2012), e alguns autores (LITTLEFAIR; AIZLEWOOD; BIRTLES, 1994; RAKHA; NASSAR, 2011; MANGKUTO; ROHMAH; ASRI, 2016; SUN *et al.*, 2020) afirmam que o conceito de uniformidade pode ser ampliado para utilização em iluminação natural.

Adota-se, em todos os normativos citados, o valor referencial de 0,7, indicando que iluminância mínima nos pontos do plano de trabalho não deve ser inferior a 70% da média. Autores como Slater e Boyce (1990) afirmam, para iluminação artificial, que a adoção do valor 0,7 de uniformidade no plano da tarefa é satisfatório em todas as atividades. Entretanto, para tarefas que ocupam regiões menores do plano de trabalho, o valor de uniformidade pode ser de até 0,5. Mangkuto, Rohmah e Asri (2016) apontam que para a adoção do conceito de uniformidade em iluminação natural faz-se necessário alterar o valor de referência, tendo em vista a variabilidade da fonte. Estudos realizados pelos autores afirmam que valores próximos a 0,2 são satisfatórios em algumas situações no clima tropical.

Outras normas internacionais divergem na definição do valor de referência da uniformidade. A norma britânica indica valores maiores que 0,8, enquanto a polonesa admite até 0,65, permitindo valores de 0,4 para ambientes de curta permanência (BOYCE, 2010). Documentos de etiquetagem das edificações, como o do *Building Research Establishment Enviromental Assessment Method*, indicam que é aceitável “uma razão de uniformidade mínima

de 0,3. Em espaços com aberturas zenitais, como átrios, deve ser admitida uma uniformidade mínima de 0,7” (BREEAM, 2014, tradução do autor)

2.2.4 Autonomia de luz natural. (ALN)

A primeira métrica a surgir em substituição ao FLD foi a autonomia de luz natural (ALN), ou *daylight autonomy* (DA). Proposta pela *Association Suisse des Electriciens* (ASE, 1989) para uso em iluminação natural, foi inicialmente definida como o percentual do ano em que um mínimo de iluminância é atingido apenas com luz natural, mesmo conceito apresentado pelo *IES Lighting Handbook* (IES, 2011)³. A forma atual ampliada surge na literatura nos trabalhos de Reinhart *et al.* (2000) e Voss *et al.* (2000) como “o percentual das horas de trabalho do ano em que um valor mínimo de iluminância consegue ser mantido apenas com luz natural” (REINHART *et al.*, 2000, tradução do autor). Outros autores como Geebelen e Neuckermans (2000) também citam o conceito, descrevendo-o como o percentual do ano em que a iluminação artificial pode ser desligada.

A primeira vez que o conceito é citado em uma revista internacional é no trabalho de Reinhart e Walkenhorst (2001), sendo esse o artigo de referência para a definição da ALN. Os autores posteriormente ampliaram-no para utilização em aberturas com sistemas de proteção solar móveis acionados manualmente, criando a autonomia de luz natural efetiva, ou *effective daylight autonomy* (REINHART, 2002; REINHART; ANDERSEN, 2006). A ALN faz parte da primeira geração de métricas anualizadas, denominadas de *Climate-based Metrics* (ENERGY DESIGN RESOURCES, 2017).

Os valores referenciais variam conforme os autores. Voss *et al.* (2000) citam que devem ser tomados os dados no horário das 8h às 18h e que deve ser atingido um valor mínimo de iluminância de 500 lx no escritório e 50 lx nos corredores. Já Reinhart (2001) amplia o conceito admitindo como valor de referência 450 lx, tomando como base o normativo da *Canadian Labour Codes* (CLC, 1991) que prevê 500 lx, com uma margem de erro percentual de 10%. Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) adotam iluminância mínima de 500 lx, citando que tal valor pode ser alterado conforme a necessidade e o uso do ambiente em estudo.

³ O conceito de métricas para a avaliação do desempenho da iluminação natural surge apenas na 10ª edição do *IES Lighting Handbook*, em 2011. A versão anterior, de 2000, cita apenas o FLD e o método simplificado para cálculo.

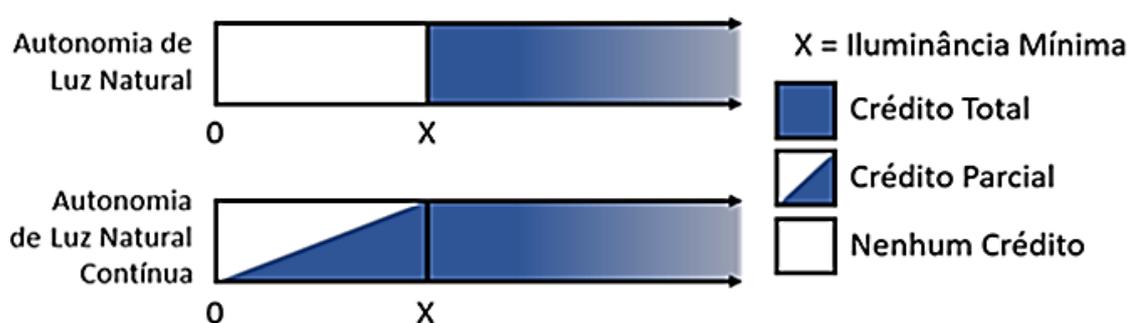
A métrica é utilizada ainda para avaliar o potencial de redução no consumo de energia elétrica. Para tanto os autores definem o valor de iluminância de referência baseado no critério de consumo de energia elétrica e de carga de iluminação instalada (REINHART, 2002).

2.2.5 Autonomia de luz natural contínua (ALNc)

O conceito inicial da ALN pode ser categorizado em dois métodos de cálculo: o incremental e o contínuo. No primeiro verifica-se apenas se o instante atende ou não ao critério estabelecido, situação que classifica o ponto em 0% ou 100% de atendimento. Já o segundo método estabelece uma classificação contínua para os instantes que não atingem o valor de referência, metodologia da qual deriva a primeira variação da ALN (GHERRI, 2015).

A primeira variação da ALN é apresentada por Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006), quando introduzem um crédito parcial linearmente proporcional ao valor obtido no caso de o sensor não atingir o valor de iluminância estabelecido. O novo conceito é denominado de autonomia de luz natural contínua (ALNc), ou *Continuous Daylight Autonomy* (DAcont) e é proposto inicialmente por Rogers (2006). A Figura 19 apresenta um diagrama que exemplifica a diferença entre os dois tipos de autonomia de luz natural citados.

Figura 19 - Comparação entre os métodos de cálculo da Autonomia de Luz Natural normal e contínua



Fonte: Elaborada pelo autor

O novo conceito não foi tão amplamente utilizado, como aponta Acosta *et al.* (2019). Diversos autores (JENNINGS; RUBINSTEIN; DIBARTOLOMEO, 2000; LINDELÖF; MOREL, 2006; JAKUBIEC; REINHART, 2011) ressaltam que usuários de ambientes de trabalho como escritórios preferem quantidades de luz menores que a determinada por norma, por causarem menor sensação de ofuscamento, tal efeito é apontado por Ko *et al.* (2017) como um ponto positivo para a utilização da métrica ALNc.

2.2.6 Autonomia de luz natural zonal (ALNz)

Até então as métricas existentes relacionavam-se apenas com um ponto de análise. O cálculo do FLD, em algumas situações, poderia ser entendido como um valor médio do plano

de trabalho, principalmente nas metodologias simplificadas. A ALN e ALNc são calculadas em apenas um sensor, sendo os dados obtidos individualmente. A Autonomia de Luz Natural Zonal (ALNz), ou *Zonal Daylight Autonomy* (zDA), é a primeira métrica em que se observa a variação temporal e espacial.

Foi proposta pela IES (2011) e apontada como uma métrica para avaliação de todo o espaço utilizando apenas um único valor. Para seu cálculo deverá ser definida a área de interesse e posteriormente calculada a quantidade de instantes que cada sensor atinge ou excede o limite estabelecido dentro do espaço temporal definido. Por fim somam-se os valores e divide-se pela quantidade de horas e sensores avaliados. Importante notar que área e espaço temporal são definidos pelo pesquisador, entretanto, o resultado final da ALNz não reflete percentual de horas ou de área, mas uma combinação de ambos.

O uso da métrica não é muito encontrado na literatura, mas é citada algumas vezes em livros (IES, 2011; EL-HAGGAR; MOUSA; EL-MORSI, 2016) e normativos internacionais (CEC, 2012; FONTOYNONT, 2012). Um estudo apresentado pela *California Energy Commission* (CEC, 2012) aponta que a utilização da ALNz possui uma importante limitação quando se busca entender o comportamento de áreas distintas do ambiente, principalmente quando da operação de elementos de proteção solar. O mesmo estudo, bem como o conceito da ALNz servirão de base para a definição de uma outra métrica, a Autonomia de Luz Natural Espacial.

2.2.7 Autonomia de luz natural máxima (ALNmax)

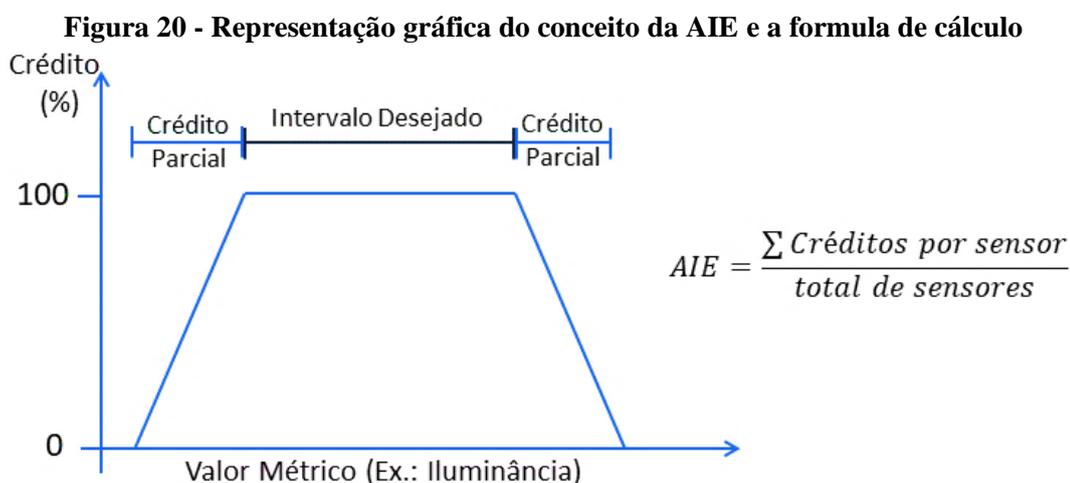
Outro conceito derivado da ALN é utilizado na verificação da probabilidade de ofuscamento. Denominado de Autonomia de Luz Natural Máxima (ALNmax), ou *Maximum Daylight Autonomy* (*maxDA*), é definido como a ALN para uma iluminância de dez vezes o previsto para o ambiente (ROGERS, 2006). O autor afirma ainda que em tais casos há incidência de luz solar direta no ponto de análise, o que causaria desconforto visual. A relação de dez vezes a iluminância prevista é indicada como referência para situações de provável ofuscamento (ROGERS, 2006) e baixa uniformidade, o que geraria desconforto visual por contraste excessivo (MARQUES, 2012).

Em outros artigos (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006; REINHART, 2010) o conceito é apresentado como a quantidade de instantes em que o sensor possui insolação direta ou quando atinge ALN para um valor de referência dez vezes maior que o estabelecido. É importante notar que no segundo conceito há duas situações distintas para climas tropicais,

que podem ser equivalentes em climas subtropicais. A ocorrência de iluminância dez vezes maior que o predefinido pode ser obtida sem necessariamente haver incidência de luz solar em climas tropicais, o que acontecerá em menor quantidade para latitudes maiores que a dos trópicos. As diferenças entre os conceitos não ficam clara nos normativos, o que pode causar confusão na utilização da métrica, como afirma Dias *et al.* (2018).

2.2.8 Autonomia de luz natural temporal (ALNt)

Como o conceito da ALNmax não permite ao usuário distinguir as frações de área ou de tempo em que a iluminância é atingida, para tanto surgiram outros dois conceitos derivados da ALN. O primeiro busca indicar o percentual de área em que um valor de ALNc é atingido em um espaço de tempo definido. Inicialmente foi chamado de *Acceptable Illuminance Extent (AIE)* (KLEINDIENST; ANDERSEN, 2012) e definido como o percentual de área em que um intervalo de iluminância é atingido, admitindo créditos parciais para valores maiores ou menores que seus limites, em um intervalo de tempo definido. Um esquema é apresentado na Figura 20.



Fonte: Adaptado: KLEINDIENST; ANDERSEN, 2012

O autor afirma que o conceito se parece com as faixas de iluminâncias utilizadas no cálculo da Iluminância Útil de Luz Natural (NABIL; MARDALJEVIC, 2006), abordada posteriormente na seção 2.2.11, já que define um intervalo e não um valor único. O que diferencia o conceito é que a AIE dá um crédito parcial a valores fora do limite, o que não acontece na métrica de Nabil e Mardaljevic (2006).

Baseado no conceito da AIE, a Autonomia de Luz Natural Temporal (ALNt), ou *temporal Daylight Autonomy (tDA)*, é definida como o percentual do tempo em que um valor de iluminância é obtido para 75% do ambiente (IES, 2011). O conceito é creditado à Kleindienst e Andersen (2012), mesmo definindo-o apenas de forma indireta. A utilização da métrica ficou

restrita a trabalhos dos autores, mas serviu como base para a definição da Autonomia de Luz Natural Espacial (PERONATO *et al.*, 2015).

2.2.9 Autonomia de luz natural espacial (ALNe)

Uma das últimas métricas derivadas da ALN é a Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe), ou *Spatial Daylight Autonomy (sDA)*. Seu conceito é definido pela *Illuminating Engineering Society* como “o percentual da área de análise que atinge a um mínimo de iluminância por luz natural em uma fração específica de horas de uso do ambiente” (IES, 2012, tradução do autor). Recomenda ainda que seja em pelo menos 50% dos instantes do ano calculados e que o valor de iluminância atingido seja de 300 lx. O mesmo documento indica ainda que valores de ALNe acima de 50% são aceitáveis e que valores acima de 75% podem ser classificados como satisfatórios. Embora a ALNe não incorpore em seu conceito questões relativas a ofuscamento ela se mostra uma métrica importante para previsão da satisfação dos ocupantes, como afirmam Mardaljevic, Heschong e Lee (2009)

Devido à grande quantidade de conceitos, em 2012 a *Illuminating Engineering Society*, tendo como base 61 pesquisas preparadas pelo *Heschong Mahone Group* e publicadas pela *California Energy Commission* (CEC, 2012), determinou duas métricas como padrão de avaliação para o desempenho da luz natural em ambientes, sendo uma delas a ALNe (IES, 2012), definindo o intervalo temporal de 8h às 18h no instante central de cada intervalo de hora, em horário local. O documento denominado LM-83 (IES, 2012) recomenda que 75% dos pontos de análise excedam 300 lx em mais de 50% do tempo, dando a classificação de ‘preferível’ e a de ‘nominalmente aceito’ quando o valor de ALNe é maior que 55%.

Normativos internacionais relacionados com a eficiência energética das edificações, como o LEED v4 (USGBC, 2019) adotam a ALNe como métrica de referência. A *Education Funding Agency* do Reino Unido, em seu normativo *EFA Daylight Design Guide* também adota a ALNe como referência para desempenho lumínico em ambientes educacionais, definindo que os ambientes precisam obter um valor de ALN de 50% em pelo menos metade do plano de trabalho para o intervalo das 8h30 às 16h (EFA, 2014). Outros normativos, como o europeu (ENERGY DESIGN RESOURCES, 2017) e o do *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM, 2016) adotam a métrica com variações no horário de cálculo.

2.2.10 Autonomia de luz natural mínima (ALNm)

O conceito mais recente derivado da ALN é a Autonomia de Luz Natural Mínima (ALNm), ou *Minimum Daylight Autonomy* (mDA) (ACOSTA *et al.*, 2019). O conceito é definido pela equação 4.

$$DA_m = \frac{\sum_i wf_i * T_i}{\sum_i T_i} \in [0,1]; \quad (4)$$

$$wf_i = \begin{cases} 1 & \text{se } E_{DO} \geq E_L \\ 0 & \text{se } E_{DO} < E_L \end{cases}$$

Onde T_i é o período do ano em que o ambiente é utilizado, dado em horas. wf_i é um fator de ponderação que depende do valor de iluminância tomado como referencial (E_L) e E_{DO} é a iluminância medida no ponto de análise para a situação de céu encoberto.

Os autores definem que a ALNm é o percentual de tempo ocupado pelo ambiente onde o valor de referência de iluminância é atingido sob condições de céu encoberto, representando o pior cenário de disponibilidade de luz natural para o ambiente. O conceito é apontado pelos autores como uma relação importante entre as métricas estáticas e dinâmicas por apresentar um procedimento de cálculo completo e não de uma relação matemática entre iluminâncias obtidas por um sensor. (CABEZUELO, 2019).

2.2.11 Iluminância útil de luz natural (IULN)

A Iluminância útil de luz natural (IULN), ou *Useful Daylight Illuminance* (UDI) é uma métrica derivada da ALN, mas que incorpora diferentes conceitos. A IULN foi proposta por Nabil e Mardaljevic (2006) e representa o percentual de horas do ano em que a iluminância está dentro de um intervalo denominado ‘útil’. Inicialmente o conceito prevê um crédito total apenas para os valores dentro do intervalo (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006), indicando que aqueles que estão fora são problemáticos de alguma forma, seja por insuficiência ou por excesso, como afirma Ko *et al.* (2017).

O conceito foi ampliado por Mardaljevic, Heschong e Lee (2009) definindo duas faixas dentro do intervalo. A primeira, entre 100 lx e 500 lx, foi denominada de suplementar e a segunda, entre 500 lx e 2.500 lx, de autônoma. O limite superior da faixa útil foi posteriormente ampliado para 3.000 lx (MARDALJEVIC *et al.*, 2011). O aumento justifica-se pelos estudos para a definição da ALNmax, apontando que para situações onde há mais de dez vezes a iluminância prevista a probabilidade de ofuscamento é grande. Em pesquisas realizadas pelos

autores (REINHART, MARDALJEVIC; ROGERS, 2006) percebeu-se tal fenômeno, o que justificou a alteração. As faixas atualmente definidas estão descritas no Quadro 2.

Quadro 2 - Descrição das zonas da Iluminância útil de luz natural

Intervalo	Classificação	Denominação	Definição
$E < 100 \text{lx}$	Não atinge a faixa útil	Insuficiente (IULN-I) (<i>UDI-fellshort or UDI-f</i>)	Quantidade insuficiente como única fonte de iluminação, sendo necessária uma significativa contribuição de iluminação artificial.
$100 \text{lx} < E < 500 \text{lx}$	Atinge a faixa útil	Suplementar (IULN-S) (<i>UDI-supplementary or UDI-s</i>)	Quantidade efetiva, entretanto, ainda necessitará de complementação artificial
$500 \text{lx} < E < 3000 \text{lx}$	Atinge a faixa útil	Autônoma (IULN-A) (<i>UDI-autonomous or UDI-a</i>)	Faixa desejável de iluminação natural
$E > 3000 \text{lx}$	Excede a faixa útil	Excedente (IULN-E) (<i>UDI-exceeded or UDI-e</i>)	Excesso de luz natural que pode produzir desconforto visual ou térmico, ou ambos.

Fonte: Adaptado de MARDALJEVIC, HESCHONG E LEE, 2009

As faixas definidas pelo índice podem ser alteradas pelo pesquisador dependendo do uso do ambiente e dos requisitos de iluminação natural desejados. Os autores afirmam que esse conceito poderá substituir o parâmetro de análise tradicionalmente mais utilizado até então, o fator de luz do dia (FLD) (NABIL; MARDALJEVIC, 2006). Alguns normativos internacionais utilizam a IULN como métrica de referência, a constar a da *Education Funding Agency* do Reino Unido, em seu normativo *EFA Daylight Design Guide* (EFA, 2014). A norma cita ainda que os ambientes deverão atingir IULN útil de 80% no plano de trabalho e que o limite superior poderá atingir 5.000 lx em situações como ambientes abertos e de atividades esportivas.

2.2.12 Saturação da luz natural (SLN)

O conceito de Saturação de Luz Natural (SLN), ou *Daylight Saturation Percentage (DSP)*, foi desenvolvido pelo *Lighting and Daylighting Committee for the Collaborative for High Performance Schools* como uma métrica que combina elementos da IULN e da ALNc (CHIPS, 2006). A métrica modifica o intervalo de iluminância útil para a faixa entre 430 lx e 4.300 lx. Os instantes que obtiverem valores de iluminância acima do limite superior recebem uma penalização, que é subtraída do intervalo útil.

Seu desenvolvimento se deu especificamente para os estudos em ambientes escolares, como afirma Gherri (2015). Normativos internacionais ligados aos conceitos de edifícios verdes adotam o conceito de SLN, como o da *International Green Construction Code* do *American Institute of Architects* (ICC, 2010).

2.2.13 Exposição solar anual (ESA)

A IES LM-83-12 (IES, 2012) traz ainda um indicador para avaliar a exposição à luz solar direta, denominado de Exposição Solar Anual (ESA), ou *Annual Sunlight Exposure (ASE)*. A métrica é definida como “o percentual da área de análise que excede a um limite específico de luz solar direta acima de uma determinada quantidade de horas no ano” (IES, 2012, tradução do autor). O documento prevê os limites de 1.000 lx em mais de 250 horas por ano (IES, 2012). Importante observar que o seu cálculo exige que o ambiente seja avaliado ao longo de um ano, em um intervalo de horas definido pelo normativo de 10 horas por dia e que o software permita a distinção da componente de sol direto.

A métrica é utilizada principalmente para avaliação da probabilidade de ofuscamento (KO *et al.*, 2017) e reflete alguns conceitos da ALN_{max}. Sua definição prevê faixas de aceitação da métrica que, segundo a LM-83 (IES, 2012), são definidas em neutra, ou nominalmente aceitável, para ESA menor que 7%; aceitável para ESA menor que 3% e insatisfatório para valores maiores que 10%. Observa-se um espaço não classificado entre 7% e 10% que não é abordado pela norma ou por qualquer outro artigo⁴. A adoção da ESA e da ALN_e segue parâmetros específicos quanto a diversas variáveis de cálculo, como malha de pontos e período de tempo.

2.3 Parâmetros de cálculo das métricas

As normas de iluminação natural e os autores de algumas métricas, ao preverem a utilização de índices de desempenho da iluminação natural, determinam requisitos para seu cálculo. Tais requisitos dizem respeito à forma como o software de simulação deve operar, bem como a escolha de parâmetros de processamento como intervalo de tempo e quantidade de sensores. Um dos fatores importantes é a malha de pontos. A norma brasileira para iluminação natural (ABNT, 2005c) prevê o cálculo da malha utilizando um índice descrito como apresentado na equação 5.

⁴ O texto da norma indica que “Em pesquisas onde o valor de ASE foi maior que 10% julgou-se que houve conforto visual insatisfatório e que os ocupantes relatam situações de desconforto por excesso de luz e ofuscamento ... Espaços com menos de 7% são considerados neutros (nominalmente aceitos), enquanto espaços com menos de 3% são claramente aceitáveis” (Tradução do autor). A maioria dos estudos verificados adotam apenas os dois últimos referenciais, de 3% e 7%. O normativo LEED v4 adota a ESA como parâmetro de avaliação e adota os 10% como valor de referência, entretanto, alguns trabalhos questionam essa definição como o de Nezamdoost e Wymelenberg (2017).

$$K = \frac{C * L}{H_m(C + L)} \quad (5)$$

Onde C e L são respectivamente largura e comprimento do ambiente e H_m é a distância entre a cota do plano de trabalho e o topo da janela. Calculado o valor de K, deverá ser verificado em uma tabela a quantidade de pontos necessárias ao ambiente, apresentado na Tabela 1. Observa-se ainda que normas de outros países, como a norma mexicana NOM-025-STPS-2008 (DGN, 2008) utilizam a mesma formulação, mas adotam valores diferentes.

Tabela 1 - Quantidade de pontos de análise da iluminação natural segundo a norma brasileira e mexicana

K	Quantidade de Pontos (ABNT, 2005c)	Quantidade Mínima de Pontos (DGN, 2008)	Quantidade Recomendada de Pontos (DGN, 2008)
$K < 1$	9	4	6
$1 \leq K < 2$	16	9	12
$2 \leq K < 3$	25	16	20
$K \geq 3$	36	25	30

Fonte: ABNT, 2005c

Outra norma que define a malha de pontos, para iluminação artificial, é a NBR ISO-CIE 8995-1-2013 em seu Anexo B (ABNT, 2013a). A fórmula para cálculo do tamanho da malha é dada na equação 6.

$$p = 0,2 \times 5 \times \log_{10} d \quad (6)$$

Onde 'p' é o tamanho da malha e 'd' é a maior dimensão da superfície de referência, ambos em metros. A quantidade de pontos na malha é expressa pelo número inteiro mais próximo da relação d/p.

A norma de desempenho das edificações residenciais, NBR 15575 (ABNT, 2013a) exige que o estudo seja feito em um ponto no centro do ambiente, em apenas quatro momentos ao longo do ano, em dois dias e em dois horários tanto para medições *in loco* quanto para dados de simulação computacional. Tal definição destoa da tendência internacional de estudos anualizados baseando-se nas *Climate-based Metrics*. Na LM-83 (IES, 2012), que define as métricas de ALNe e ESA, não é definida uma forma de cálculo da malha baseada nas dimensões do ambiente, mas unicamente define que os pontos devem estar espaçados no máximo 60cm.

Nos estudos de iluminação natural em ambientes internos (ALBUQUERQUE; AMORIM; 2012; GUIDI *et al.*, 2018; CARVALHO, 2018) observa-se a predominância da escolha da malha de pontos utilizando os parâmetros descritos na NBR 15215-4 ou na ISO/CIE 8995-1. Em outros casos, os autores não informam a origem da escolha da malha

(FONTENELLE; CLARO; ARAÚJO, 2011; MAIOLI; ALVAREZ, 2013) ou sequer informam quantos pontos foram utilizados (FONSECA; PEREIRA, 2017; FERNANDEZ, 2017; PEREIRA, 2017).

No artigo que define a IULN não se encontram menções a requisitos de quantidade de pontos de análise (NABIL E MARDALJEVIC, 2006). Entretanto, em algumas aplicações realizadas para atestar a sua eficácia, estes autores utilizaram no máximo 1,0 pt/m². Os autores indicaram ainda que o estudo deveria ser anualizado, mas deixam a quantidade de dias e horas de análise a critério do projetista, que deve considerar os períodos de utilização do ambiente.

Ao tratar da quantidade de pontos necessária para o cálculo da ALN autores como Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) definem que a malha de pontos deverá ter distância máxima de 0,5m entre os pontos e que densidades maiores podem ser utilizadas em casos particulares. Aponta ainda que devem ser utilizadas todas as horas diárias de sol, mesmo que o ambiente não seja usado durante todo o período. Em casos particulares, outros intervalos podem ser utilizados. Autores como Dogan e Park (2018) trabalharam com essa variação temporal e perceberam que há significativa influência no resultado, quando a quantidade de horas de cálculo é alterada.

A LM 83-12 (IES, 2012) descreve de forma objetiva os requisitos de horas e dias do ano para os índices ESA e ALNe que se realizará em intervalos de uma hora, das 8h às 18h, horário legal, durante todo o ano, totalizando 3650 horas. Define, ainda, que os pontos devem ter distância máxima de 0,60m entre si e 0,30m das paredes. Essa distância máxima foi definida por conseguir atender adequadamente todas as possibilidades de área de trabalho (IES, 2012). Tais parâmetros derivam do estudo realizado pela *California Energy Commission*, que analisou 61 pesquisas, comparando diversos parâmetros e resultados obtidos (CEC, 2012).

Os normativos citados adotam como altura do plano de trabalho: 0,75m (ABNT, 2013a; ABNT, 2013b), 0,76m (IES, 2012) e 0,80m (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). Boyce (2010) aponta que em alguns países a altura do plano de trabalho é ainda maior, como no caso da Polônia, com 0,85m.

Estudos de Brembilla, Mardaljevic e Anselmo (2015) apontam que não é apenas o aumento na quantidade de pontos que fará com que os resultados de métricas aplicadas sejam mais precisos e que parâmetros como densidades em diferentes regiões também são importantes. Os autores apontam para o fato de que em regiões mais próximas das aberturas há necessidade de uma maior densidade de sensores que em outras mais profundas.

Importante destacar que, exceto o estudo citado anteriormente, não foram encontradas até então pesquisas que verifiquem a influência da malha de pontos no cálculo da iluminância média ou de qualquer das métricas citadas.

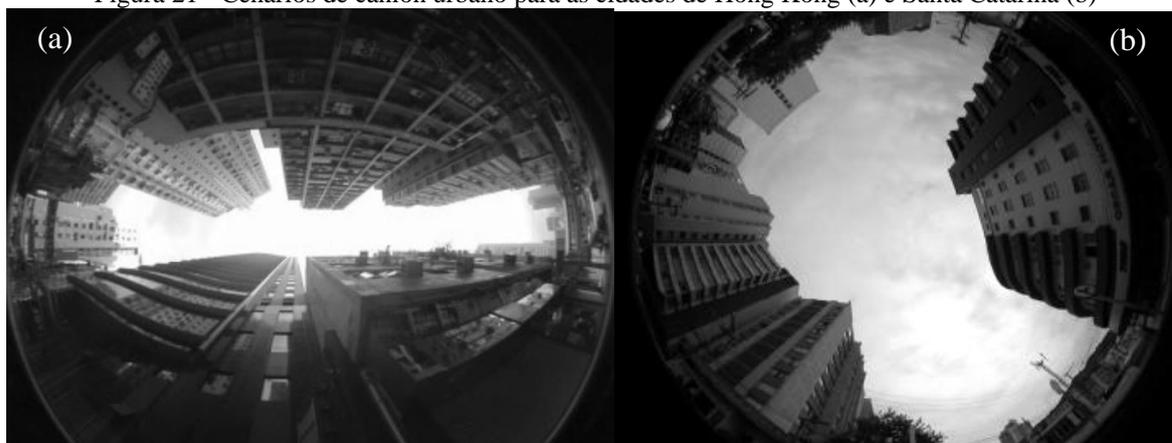
2.4 Índices de avaliação da visão de céu

Ao longo do tempo outros índices foram desenvolvidos para avaliação do desempenho lumínico do ambiente construído e que não necessariamente utilizam a iluminância como valor de referência. A visão de céu apresenta-se como importante fator para o conforto ambiental nos centros urbanos, principalmente com o estudo das ilhas de calor urbanas e da disponibilidade de luz natural em cenários de cânion urbano.

2.4.1 Fator de visão de céu (FVC)

O Fator de Visão de Céu é a define a região do céu visível a partir do ponto de vista de um observador. Chapman, Thornes e Bradley (2002) definem o FVC como um parâmetro percentual que relaciona a porção de céu visível a partir de um ponto e a porção potencialmente disponível para o mesmo ponto. Ele assume valor 0 (zero) em um céu totalmente obstruído e 1 (um) em um céu totalmente desobstruído. Exemplos de situações com menor e maior visão de céu são vistos na Figura 21.

Figura 21 - Cenários de cânion urbano para as cidades de Hong Kong (a) e Santa Catarina (b)



Fonte: (a) CHEN *et al.*, 2012 e (b) LEDER; PEREIRA, 2008

Diversos estudos indicam a relação do FVC com o conforto térmico e lumínico nos ambientes urbanos. Para Oke (1981) o FVC é importante quando se analisa as trocas de calor e radiação dentro do cânion urbano, tanto que o autor desenvolve uma formulação matemática onde a máxima intensidade da ilha de calor é correlacionada diretamente com o FVC. Autores como Leder e Pereira (2008) apontam que a ocupação urbana permitida pela legislação para algumas cidades brasileiras pode reduzir de forma significativa a disponibilidade de luz natural

no cânion urbano e que a definição dos limites de obstrução deverá também basear-se em tais parâmetros. Em contrapartida, vias de grande largura também podem surtir efeito indesejado, como indica o trabalho de Oliveira e Romero (2007), resultando em grandes fachadas expostas à radiação solar direta e, conseqüentemente, uma grande carga térmica absorvida. Estudos de Laranja *et al.* (2009; 2013) apontam que a largura das vias e a orientação das aberturas possuem relação direta com a disponibilidade de luz natural nos ambientes.

O estudo realizado por Araújo e Cabús (2007) na cidade de Maceió-AL concluem que, apesar de baixos valores de FVC nos modelos estudados, as médias de iluminância interna foram satisfatórias quando analisada a contribuição das superfícies de entorno em tal iluminância. Para os autores, quanto maior o ângulo de obstrução vertical da janela, maior é a contribuição proveniente das superfícies externas, por reflexão. Em cânions profundos, com menores valores de FVC, a contribuição da luz refletida torna-se componente predominante na iluminância total interna.

Lima (2015) aponta que as diversas formas urbanas previstas no plano diretor da cidade de Maceió, para zonas de ocupação e verticalização recentes, permitem que haja disponibilidade de luz natural suficiente ao longo do dia. A autora cita ainda os estudos de Laranja (2010), para a cidade de Vitória - ES, que demonstraram significativa redução dos valores de iluminância em decorrência da presença de edificações obstruidoras, fato que não foi observado no trabalho de Lima (2015).

O fator de visão de céu (FVC) não deve ser tomado como único parâmetro definidor das condições de adensamento urbano e de obstrução de entorno, como afirmam Minella *et al.* (2009). Para os autores, algumas características do desenho urbano como largura das vias, altura das edificações e orientação do cânion têm forte influência no ganho de radiação solar e conseqüentemente no conforto do usuário. O fator de visão de céu, nesses casos, é útil ao servir como parâmetro urbanístico, contribuindo para uma organização sustentável do espaço e melhorando a conexão entre estudiosos do clima e projetistas.

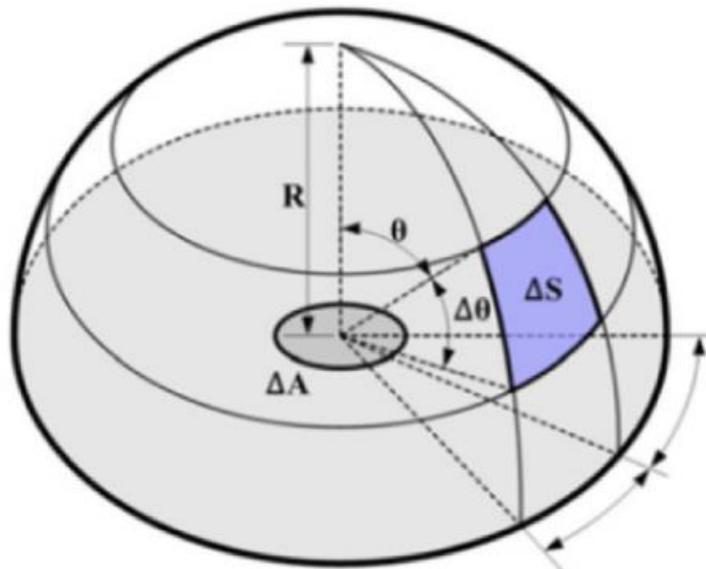
Oke (1987) propõe ainda um outro parâmetro de avaliação da visão de céu, dado pela região entre as paredes, ou fachadas, de dois edifícios adjacentes e o plano da rua que os separa. Denominado de relação H/W, a razão entre altura dos edifícios (H) e a largura da via (W). O autor aponta que ele está relacionado com o FVC e que é um parâmetro importante quando se analisa as trocas de calor e radiação dentro do cânion urbano.

Nesse sentido o FVC se apresenta como importante parâmetro de avaliação da visão de céu na edificação. Observa-se a grande quantidade de trabalhos que o associam com o ambiente urbano, entretanto, é possível utilizá-lo para avaliação do ambiente interno. Autores como Carvalho *et al.* (2018) indicam que o tamanho da janela, o elemento de sombreamento externo e o FVC são os principais influenciadores da disponibilidade de luz natural nos ambientes.

2.4.2 Fator de céu ponderado (FCP)

No conceito inicial do FVC toda a abóbada celeste é tratada da mesma forma, sendo calculada a área de céu visível a partir do ponto. O FCP é semelhante ao FVC, entretanto, admite que cada região do céu tem potencial diferente de fornecer luz natural para o ponto onde ele é calculado. Esse conceito, definido por Chapman, Thornes e Bradley (2002) em termos de área, inicialmente era tratado de outra forma, sendo considerada a energia radiante que o setor de céu visível fornecia, essa em função da altura solar e corrigida pela lei do cosseno (JOHNSON; WATSON, 1984), como mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Fator de Céu ponderado (FCP) pelo cosseno



Fonte: NASROLLAHI, SHOKRI, 2016

Alguns softwares de cálculo, como o RayMan e o SkyHelios permitem o cálculo do FVC com ponderação (HAMMERLE *et al.*, 2011) em um conceito semelhante ao do FVC. Uma implementação do FCP foi feita por Cabús (2002) para o software de simulação em iluminação natural TropLux (CABÚS, 2005) utilizando os princípios do raio traçado associado aos coeficientes de luz natural (TREGENZA; WATERS, 1983). Nesse sentido o Fator de Céu Ponderado é uma grandeza percentual que relaciona a energia luminosa fornecida de forma direta pelo céu em um ponto com aquela de um céu totalmente desobstruído.

2.5 Conclusão

Existem diversas ferramentas de avaliação da disponibilidade de luz natural nas edificações, entretanto, cada uma delas carrega consigo limitações que restringem suas possibilidades de aplicação. O FLD, como uma das métricas mais utilizadas, apresenta algumas limitações quanto à sua aplicabilidade, já que pode ser definido como uma métrica estática, relacionada com a geometria do ambiente. Aspectos como orientação e obstruções de entorno não são propriamente abordados, bem como o cálculo apenas para céu do tipo encoberto. Aspectos relativos ao consumo de energia elétrica e influências de céu parcialmente nublados ou claro precisariam de uma outra métrica de avaliação de seu desempenho.

Diversas métricas surgiram para sanar as dificuldades do uso do FLD, especialmente aquelas denominadas de *Climate-based Metrics*, permitindo que o estudo seja realizado de forma anualizada, baseado em dados meteorológicos locais, permitindo que os resultados expressem com maior fidelidade as condições reais. O desenvolvimento de ferramentas computacionais para o cálculo da iluminância é um fator que impulsiona a criação de novas métricas, como consequência a obtenção de resultados se torna mais rápida e precisa, aumentando o volume de dados possíveis de serem analisados simultaneamente.

O cálculo das métricas nem sempre vem acompanhado da definição precisa dos parâmetros de simulação ou medição necessários para sua eficiência, fazendo com que o pesquisador necessite buscar outros normativos para defini-los. No tocante à malha de pontos a questão é mais evidente tendo em vista que apenas alguns normativos a definem, mas que, como mostrado, utilizando metodologias diferentes que resultam, na maioria das vezes, em malhas diferentes para cada normativo.

3 Estatística aplicada ao tratamento de dados em conforto ambiental

A avaliação de parâmetros de conforto em arquitetura comumente utiliza a análise exploratória de resultados como método de estudo. A elaboração de tabelas e gráficos, nesse sentido, apresenta-se como requisito fundamental para compreender o comportamento de parâmetros de entrada e saída, seja em modelos computacionais ou em uma pesquisa de campo. Com os resultados obtidos, faz-se necessária a utilização de ferramentas de confirmação que garantam a precisão dos comportamentos observados.

Os dados obtidos em pesquisas podem ser de dois tipos: métricos e não métricos. O primeiro atribui-se a valores identificados em diferentes quantidades ou graus, como distância, volume e massa; ao segundo são atribuídas características ou propriedades categóricas que identificam ou descrevem um indivíduo ou objeto (HAIR; ANDERSON; BABIN, 1995). Essa distinção introduz um novo conceito no momento da escolha: a escala de mensuração, que pode ser nominal, ordinal, intervalar e de razão. As duas primeiras são classificadas pelos autores como quantitativas ou qualitativas.

As escalas não métricas, ou qualitativas, são normalmente utilizadas em estudos que envolvem algum grau de subjetividade, como em pesquisas de âmbito social, em avaliação pós-ocupação (APO) e entrevistas na arquitetura (ELALI, 2002; MORAES, 2008, RANGEL *et al.*, 2020). A escala métrica é comumente utilizada em pesquisas na área de tecnologia da arquitetura, quando os dados de análise são frutos de medições ou simulação computacional.

A avaliação de dados métricos está associada a uma grande quantidade de variáveis. Em estudos na área de conforto tanto os parâmetros de entrada, utilizados em simulações ou medições *in loco*, quanto os valores obtidos incluem diversas dimensões de variáveis que não são facilmente analisadas sem o uso de ferramentas adequadas. Valores comuns utilizados na estatística, como média e desvio padrão, já não são suficientes para tais análises. As ferramentas da estatística multivariada são de fundamental importância para a avaliação de grupos de dados com um número razoável de variáveis simultâneas. As técnicas podem ser separadas em dois tipos (MORAES, 2008): de dependência, como a regressão múltipla, e de interdependência, como a correlação canônica. Algumas técnicas e suas aplicações são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Categorização das técnicas e objetivos das ferramentas de análise da estatística multivariada

Classificação	Técnicas Relacionadas
Investigação da dependência entre as variáveis: Todas as variáveis são mutuamente independentes ou uma ou mais variáveis são dependentes de outras.	Análise Discriminante / Análise de Regressão / Correlação Canônica / Regressão Logística / Análise Conjunta MANOVA
Predição: A relação entre as variáveis deve ser identificada a fim de prever o valor de uma ou mais outras variáveis com base na mesma observação.	Análise Discriminante Análise de Regressão Análise de Regressão Logística
Construção de hipóteses e testes: Hipóteses estatísticas, formuladas em termos de parâmetros da população multivariada, são testadas, podendo ser feito para validar premissas ou para reforçar convicções prévias	Modelagem de Equações Estruturais Análise Fatorial Confirmatória
Redução dos dados ou simplificação estrutural: O fenômeno estudado deverá ser representado da forma mais simples e sintética possível, sem perder informações importantes.	Análise Fatorial Exploratória
Agrupamento de objetos ou variáveis: Grupos de objetivos ou variáveis “similares” são criados com base nas medidas características.	Análise de Conglomerados Análise de Correspondência Escalonamento Multidimensional

Fonte: Adaptado de Johnson e Wichern (1998)

Vale destacar que a maioria dos estudos na área de conforto ambiental classificam-se no primeiro tipo descrito, em que é verificada a dependência entre parâmetros de processamento ou de medição. Dentro desse contexto os testes de hipóteses de comparações múltiplas entre grupos, como o de Tukey ou o de Fisher, podem ser aplicados.

O uso de ferramentas da estatística aplicadas à avaliação do conforto de usuários não é recente. Autores como Givoni (GIVONI, 1969) na década de 1960 utilizam um banco de dados de estudos em diversos países para compor suas cartas bioclimáticas. Na mesma década Fanger (1970) desenvolve a equação do conforto térmico, para previsão da sensação térmica esperada por uma pessoa “média” no interior de uma edificação. O autor determina duas grandezas (*Predicted Percentage of Dissatisfied* - PPD e *Predicted Mean Vote* - PMV) mensuráveis e calculadas por equações que foram geradas por métodos de regressão multivariada.

Recentemente técnicas de estatística avançada vem sendo aplicadas nos estudos ligados à arquitetura, como a estatística multivariada (AMOLE, 2009; MOTA, 2007), a lógica fuzzy (MORAES, 2008) e as redes neurais (NASCIMENTO, 2016). Ferramentas simples da estatística continuam sendo aplicadas nas pesquisas em arquitetura, entretanto, há uma grande lacuna quando se observa que uma fração pequena dos trabalhos utilizam técnicas mais avançadas.

A utilização de tais ferramentas requer que o estudante e o pesquisador reconheçam sua utilidade, onde docentes e discentes possam favorecer uma visão integrada da estatística e seu ensino nos cursos graduação e pós-graduação (TURIK; VIALI; MORAES, 2012). Pesquisa desenvolvida por Santos (2015) aponta que os planos de curso de pós graduação não instrumentalizam o professor para trabalhar com os conceitos de probabilidade e estatística, tendo em vista que são pouco abordados nas grades curriculares nacionais.

Algumas ferramentas da estatística podem ser encontradas sendo utilizadas nos trabalhos na área de conforto ambiental, como a matriz de correlação e a análise de variância, entretanto, ainda de forma muito tímida. A utilização de ferramentas avançadas ainda é escassa, mas possui grande potencial de aplicação. Na sequência serão apresentadas algumas ferramentas possíveis de serem utilizadas em análise de dados em conforto ambiental e que serão utilizadas no presente trabalho.

A utilização de ferramentas da estatística no tratamento de dados em conforto ambiental ainda é pequena, o que motivou uma pesquisa nos anais dos dois principais congressos nacionais da área (ENCAC e ENTAC), a fim de verificar a utilização de ferramentas da estatística nas pesquisas publicadas entre 2009 e 2019, cujo artigo completo consta no APÊNDICES

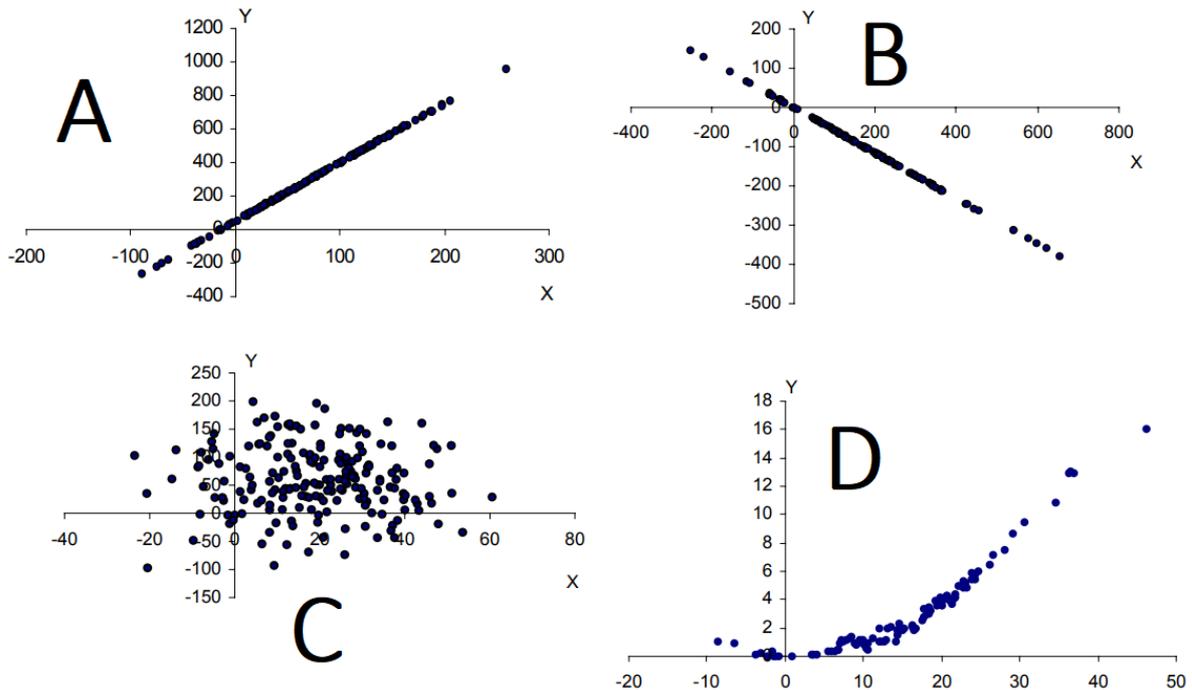
APÊNDICE 1. Nesse estudo foi possível identificar quais as principais ferramentas utilizadas nos trabalhos da área de conforto luminoso, sendo elas principalmente os testes de Análise de Correlação e ANOVA.

3.1 Análise de correlação

Nos estudos que envolvem mais de duas variáveis é comum o interesse em identificar a relação entre elas. A ferramenta estatística que apresenta o grau de relação entre duas variáveis é o coeficiente de correlação, também conhecido como medida de associação ou de intercorrelação.

Podem existir várias formas de correlação, desde a linear simples até a não-linear. O método que permite o estudo das associações é chamado de análise de correlação. Para melhor definir que tipo de relação há entre as variáveis é possível utilizar um gráfico de dispersão, como apresentado na Figura 23. Os gráficos A e B apresentam correlações perfeitas entre variáveis, sendo uma positiva e outra negativa, respectivamente. O gráfico C mostra uma correlação nula entre variáveis, enquanto que o D apresenta uma correlação não linear.

Figura 23 - Exemplos de gráficos de dispersão para correlação onde (A) e (B) são lineares, (D) é não-linear e (C) não é possível identificar correlação



Fonte: LIRA, 2004

A utilização de testes paramétricos em conjuntos de dados pressupõe a verificação de algumas suposições como distribuição normal, variância constante (homocedacidade) e independência. A falha nessas suposições levará a um nível de significância alterado, perdendo precisão nas estimativas obtidas (SIQUEIRA, 1983).

Existem diversas formas de calcular o valor da correlação, sendo a mais simples delas o coeficiente linear de Pearson (SCHULTZ; SCHULTZ, 1992). Para sua utilização é necessário que as variáveis envolvidas sejam aleatórias, medidas em uma escala intervalar, que possuam uma distribuição normal e que sejam amostras pequenas (BUNCHAFT; KELLNER, 1999). Uma a uma, as variáveis são analisadas e é retornado um valor que pode ser analisado quantitativamente e que corresponde à relação entre elas, avaliada conforme o Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação dos valores para correlação linear de Pearson, em que p é o valor da correlação

Intervalo	Classificação da Correlação
$0,00 < p < 0,30$	Fraca correlação linear
$0,30 \leq p < 0,60$	Moderada correlação linear
$0,60 \leq p < 0,90$	Forte correlação linear
$0,90 \leq p < 1,00$	Correlação linear muito forte

Fonte: CALLEGARI-JACQUES, 2003

As variáveis utilizadas no estudo podem ser analisadas individualmente, resultando em um único valor de correlação, ou em grupos de variáveis, resultando em uma matriz de correlação, onde o cruzamento de colunas e linhas contém o dado referente à relação entre as variáveis contidas na linha e na coluna.

A utilização a matriz de correlação em trabalhos na área de Iluminação natural pode ser encontrada desde trabalhos apresentados em congressos (FONSECA *et al.*, 2019) e revistas nacionais (HARA; PEREIRA, 2020) a teses (CABÚS, 1997; FERNANDES, 2016). A utilização em trabalhos na área de conforto ambiental normalmente está associada à verificação da influência de parâmetros de processamento ou de modelagem entre si.

3.2 ANOVA

A análise de Variância (ANOVA) é um método para testar a igualdade de três ou mais médias populacionais baseado na análise das variâncias amostrais. As amostras podem ser classificadas por grupos segundo uma determinada característica, denominada de fator. Para seu uso pressupõe-se que a população possua distribuição normal, tenha mesma variância, as amostras sejam independentes e sejam obtidas de populações classificadas em uma única categoria.

Autores como Montgomery e Runger (2009) apontam que a análise de variância pode ser usada quando há um conjunto de dados grande e que nele se calcula a média em alguma dimensão, seja temporal ou espacial. A ANOVA entra como uma ferramenta para verificação da relação entre as médias, testando hipóteses de igualdade ou desigualdade. Admitido que as médias entre dois grupos são iguais, não há como, dentro dos grupos, haver categorização ou agrupamentos de comportamentos. Quando se admite uma média diferente outros testes de hipóteses podem ser utilizados para verificar quais diferenças são encontradas.

O teste ANOVA consiste em admitir duas hipóteses: as médias da variável quantitativa nas categorias da variável qualitativa são iguais ou diferentes. Quando o resultado do teste ANOVA é menor que 5%, a hipótese nula deve ser rejeitada, logo as médias das variáveis são estatisticamente iguais para as várias categorias. Quando o resultado é maior que 5% não se rejeita a hipótese nula (HAIR; ANDERSON; BABIN, 1995). Quando não se verifica o pressuposto da homogeneidade de variâncias ou o pressuposto da normalidade, em vez da ANOVA é indicado o uso do teste não paramétrico de Tukey.

A utilização da ANOVA em pesquisas na área de iluminação natural normalmente está associada à investigação da relação entre parâmetros, ou na determinação de diretrizes a partir

de estudos paramétricos, como pode ser encontrado em artigos publicados em anais de congresso (ROSSETI *et al.*, 2010; LEAL; LEDER, 2016), artigos em revista (SANTOS; AUER; SOUZA, 2017), dissertações (FERREIRA, 2010; MEDEIROS, 2018) e teses (KESKIN, 2019).

3.3 Teste de Tukey

O teste de Tukey (TUKEY, 1953) verifica quais as diferenças estatisticamente significantes entre médias (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Assumindo que em um teste de ANOVA foi observada a negação da hipótese de médias iguais é possível realizar o teste de Tukey para determinar quais médias são iguais entre si. Para o teste admite-se uma letra para cada grupo, nesse sentido cada média possui uma ou mais letras, a indicar o grupo que possui similaridade.

Tal teste é importante para análises no campo do conforto ambiental, pois permite a verificação de parâmetros mensuráveis e a determinação de sua tendência. Observa-se a utilização do teste de Tukey em trabalhos de engenharia (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2015) e arquitetura (BARTHOLOMEI, 2003; ZANLORENZI; SILVA FILHO, 2018) e em trabalhos que relacionam ambos (MARTINS, 2018).

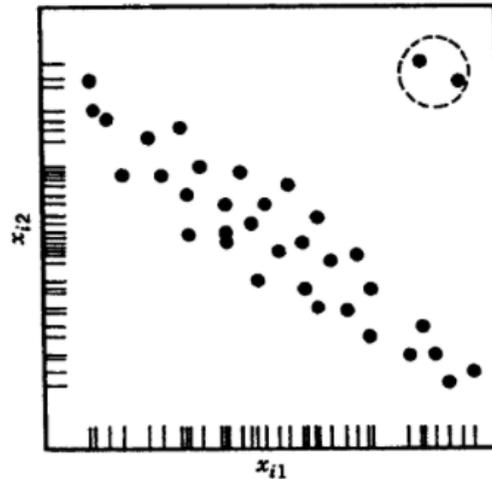
3.4 Tratamento de valores espúrios

Dentro dos conjuntos de dados obtidos em simulação computacional, principalmente quando esses se baseiam em dados reais, há grande possibilidade da ocorrência de valores que não correspondem ao comportamento global do fenômeno observado. Esses valores, denominados de valores espúrios (valores espúrios) podem ser originados de erros na medição ou de eventos atípicos (ROUSSEEUW; LEROY, 1987). Um exemplo desse tipo de resultado é apresentado na Figura 24.

Não é possível definir um método de detecção e tratamento de valores espúrios que seja genérico ou universalmente aplicável tendo em vista as particularidades de cada grupo de dados. Na detecção de valores espúrios o pesquisador deverá selecionar aquele que melhor se aplica ao seu conjunto de dados (HODGE; AUSTIN, 2004).

Os métodos existentes permitem a detecção dos valores espúrios para posterior tratamento dos dados, dentro desses é possível destacar três que são mais comumente utilizados: o método Desvio Padrão Médio (*Standard Deviation Method*), o método do desvio absoluto médio (*Median Absolute Deviation Method*) (MAD) e o do Intervalo Interquartil (*Interquartile Deviation Method*) (IQD).

Figura 24 - Nuvem de dados com ênfase em tracejado em dois pontos fora do comportamento geral dos dados, identificados como Valores espúrios



Fonte: ROUSSEEUW; LEROY, 1987

O primeiro método utiliza como referência a média e o desvio padrão dos resíduos, que são calculados e comparados. Caso um valor esteja a um determinado número de desvios padrão da média ele é identificado como um valor espúrio. O número especificado de desvios padrão é chamado de limite, e comumente é adotado três. Um dos problemas com a adoção desse método é que os valores espúrios aumentam o desvio padrão, logo quanto mais extremo for o valor discrepante, mais o desvio padrão será afetado e menor será a efetividade da detecção (ROUSSEEUW; LEROY, 1987).

O método MAD utiliza a mediana dos resíduos, em seguida, a diferença é calculada entre cada valor e essa mediana. As diferenças são expressas como seus valores absolutos e uma nova mediana é calculada e multiplicada por uma constante derivada empiricamente para produzir o desvio absoluto da mediana (MAD). Quando um valor está a um certo número de MAD longe da mediana dos resíduos ele é classificado como um valor espúrio e o limite padrão também é três. Uma das fragilidades do método é que se mais de 50% dos pontos de dados tiverem valor zero a determinação dos Valores espúrios fica inviabilizada. Importante destacar que o MAD é o mais indicado para utilização associado ao teste de Tukey, como aponta Howell (2005)

O último método é o do Intervalo Interquartil, também conhecido como $1.5 \times \text{IQR}$. Nele a mediana dos resíduos é calculada, juntamente com o primeiro e quarto quartis, e cuja diferença deles é o desvio interquartil (IQD). Em seguida é calculada a distância entre cada valor e a mediana. Essa distância é tomada como referencial, onde a partir de 1.5 distante da mediana dos resíduos, esse valor é classificado como um valor espúrio.

O tratamento de valores espúrios antes da utilização de testes de hipóteses, como a ANOVA e o Teste de Tukey, permitem que as inferências obtidas se baseiem no comportamento real do conjunto de dados. A utilização de tais valores pode mascarar o comportamento global dentro dos testes de hipóteses.

3.5 Conclusão

A utilização de novas métricas de avaliação do desempenho da luz natural, que preveem estudos atualizados, faz com que o volume de dados fornecidos pelos softwares de simulação seja cada vez maior, entretanto, esse aumento não é acompanhado do aumento no uso da estatística como ferramenta de análise dos resultados. O estudo identifica grande potencial no uso de ferramentas da probabilidade e estatística nos estudos em iluminação natural para as pesquisas avaliadas, entretanto, é importante que pesquisadores, docentes e discentes estejam familiarizados com seu uso e vislumbrem possibilidades de melhoria em suas análises com a aplicação de tais ferramentas.

A identificação correta da ferramenta necessária às inferências nos conjuntos de dados que o pesquisador tenha é determinante no sucesso da aplicação dos métodos estatísticos de tratamento de dados. Cada tipo de dado e variável possui determinadas características que, se feita a escolha errada, podem chegar a conclusões equivocadas, mas que se feitas da forma correta permitem a melhor compreensão dos dados estudados.

Como citado anteriormente, a utilização de ferramentas da estatística no tratamento de dados em conforto ambiental motivou uma pesquisa nos anais dos dois principais congressos nacionais da área (ENCAC e ENTAC). Diante dos dados obtidos observa-se que apenas 22% dos trabalhos, em média, utilizam-na, enquanto mais de 80% deles possuem potencial para utilizá-la. Não foi possível identificar a causa da pouca utilização, entretanto, observou-se que as análises que empregam ferramentas visuais, como renderizações e imagens em falsa cor, são frequentes. Nesse sentido é perceptível o potencial para o uso de tais ferramentas no tratamento de dados.

4 Influência da malha de pontos e sua setorização nas métricas de desempenho da luz natural

Diante do apresentado no capítulo 2 e da falta de estudos acerca da influência da malha de pontos de simulação sobre as métricas de avaliação de desempenho da luz natural é que foram estruturadas as fases da pesquisa. Inicialmente foram verificadas as influências da variação da malha de pontos, posteriormente analisado o comportamento frente à setorização dessa malha, tendo esses servido de base para a elaboração da metodologia proposta das análises posteriores.

O estudo foi dividido em três fases, a primeira buscou identificar a relação entre algumas métricas selecionadas e a variação na quantidade de pontos de processamento no ambiente. Essa etapa gerou a publicação de um artigo em revista nacional, apresentado no APÊNDICE 2. A segunda fase procurou verificar a relação entre a setorização do plano e trabalho e a variação de densidades de pontos dentro dos setores e sua relação com as métricas selecionadas anteriormente e com as componentes de luz natural e permitiu a publicação de artigo em congresso nacional, conforme APÊNDICE 3. As duas fases citadas correspondem aos objetivos específicos um e dois da tese.

A terceira fase compreende os objetivos específicos 3 e 4 e buscou verificar a relação entre a setorização e a densidade de pontos por setor com alguns parâmetros da simulação como latitude, obstrução de entorno e orientação a fim de propor uma metodologia para a determinação de malhas não uniformes. A terceira fase será abordada no capítulo 5.

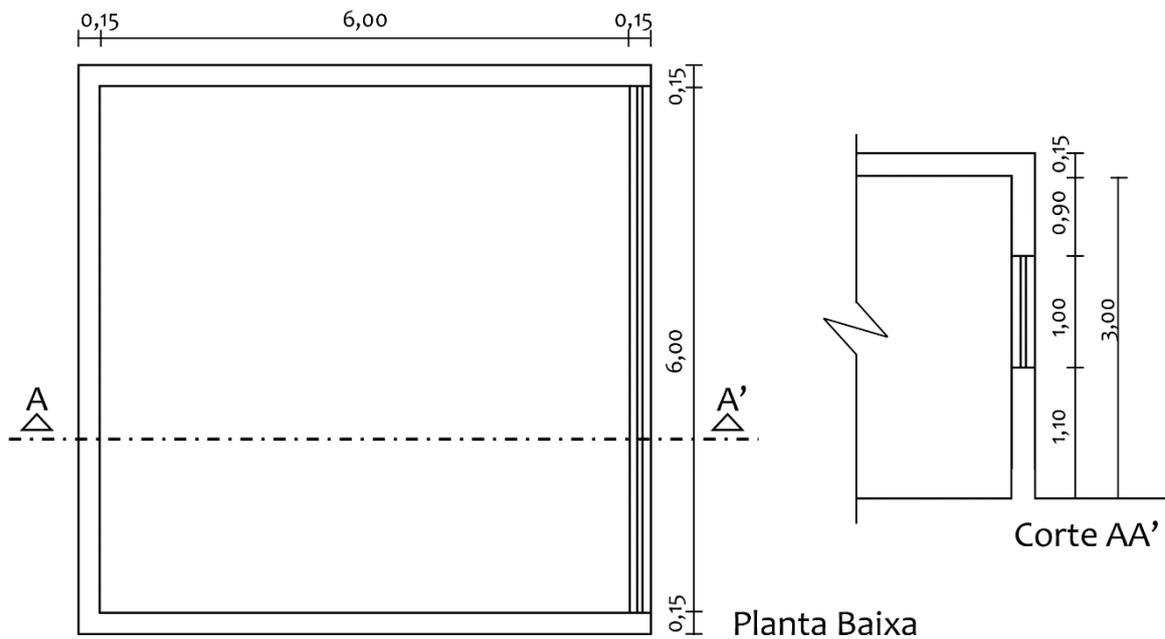
A apresentação da metodologia, análise dos resultados e conclusão será feita de forma individual e separada para cada uma das fases de estudo, finalizando com uma conclusão geral a partir dos resultados obtidos em cada fase. Alguns parâmetros metodológicos utilizados para as fases são comuns a fim de permitir o cruzamento dos resultados e conclusões obtidas.

4.1 Fase 1: Metodologia

A primeira fase do estudo busca identificar a influência da variação na quantidade de pontos de cálculo da iluminância e o resultado das métricas de avaliação de desempenho da luz natural. Os procedimentos e ferramentas utilizadas foram divididos em etapas, que englobam a definição do modelo computacional, a escolha das métricas estudadas, a definição dos parâmetros de simulação, a simulação computacional, a análise exploratória e a análise estatística.

O ambiente utilizado para as simulações foi definido tendo como base alguns trabalhos que avaliam a disponibilidade de luz natural no clima tropical (GUIDI *et al.*, 2018; CARVALHO, 2018; DIAS *et al.*, 2018). As dimensões adotadas foram de 6,00m x 6,00m, com pé direito de 3,00m. A abertura é lateral, sendo uma janela em fita com 1,00m de altura e 1,10m peitoril, conforme mostrado na Figura 25, sem obstruções externas. As refletâncias do piso, paredes e teto foram de 0,3; 0,7 e 0,8 respectivamente.

Figura 25 - Planta baixa e corte do ambiente utilizado nas simulações computacionais para as fases 1 e 2. (Unidade: m)



Fonte: Elaborada pelo autor

Posteriormente foram escolhidos os índices de avaliação de desempenho da luz natural utilizados no estudo. A escolha se justifica nesta etapa metodológica tendo em vista que a determinação de alguns parâmetros de simulação, como malha de pontos e intervalo temporal, deve ser feita com base nos parâmetros requeridos para cada métrica, estando as métricas escolhidas apresentadas no Quadro 5.

A Iluminância média anual (EMA) foi tomada como métrica de comparação entre o desempenho dos modelos, por isso não apresenta valores de referência. Durante a obtenção dos resultados verificou-se que a adoção do referencial de 300 lx para a ALN seria facilmente atingido, fazendo com que os resultados do índice fossem pouco expressivos. Para minimizar tal efeito adotou-se o valor de 1.000 lx, resultando em variações possíveis de serem analisadas estatisticamente. Os demais índices mantiveram seus valores de referência.

Quadro 5 - Resumo das métricas utilizadas, sua origem e os valores de referência adotados

Índice	Sigla	Referência	Referenciais
Iluminância Média Anual	EMA	(ANBT, 2005a, 2005b, 2013c)	-
Uniformidade (da Iluminância) Média Anual	UMA	ABNT (2013b)	0.7 (70%)
Autonomia de Luz Natural	ALN	Reinhart e Walkenhorst (2001)	1.000 lx
Autonomia de Luz Natural contínua	ALNc	Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006)	1.000 lx
Autonomia de Luz Natural espacial	ALNe	IES (2012)	1.000 lx
Iluminância Útil de Luz Natural	IULN	Nabil e Mardaljevic (2006)	100 lx; 500 lx; 3.000 lx
Exposição Solar Anual	ESA	IES (2012)	1.000 lx 250 h

Fonte: Elaborada pelo autor

As simulações ocorreram das 8h às 18h (hora legal), no meio do intervalo, todos os dias do ano, totalizando 3.650 horas, como previsto na IES LM-83 (IES, 2012), atendendo também aos requisitos das demais métricas. Foi utilizado o Céu com Distribuição Dinâmica de Luminâncias (CDDL) para a cidade de Maceió. O CDDL escolhe um dos tipos de céu CIE (2002), de acordo com sua probabilidade, no dia e na hora calculados, usando os estudos de Cabús (2002) e de Manhas (2016). O modelo de céu utilizado utiliza a subdivisão de 145 e 5221 partes CIE (2002) conforme Cabús (2002).

Foi definida a malha de pontos de processamento conforme o Quadro 6 com variação de 2x2 a 15x15. O ponto de análise está posicionado no centro de cada setor em todo o plano de trabalho. Sua variação buscou atender a NBR 15215-4 (ANBT, 2005c) e a IES LM-83-12 (IES, 2012) com folga para mais e menos pontos, a fim de analisar o comportamento dos resultados.

Foram definidas duas orientações para as aberturas, sul e leste, tendo em vista a trajetória solar aparente para a cidade de Maceió-AL, utilizada para a simulação. Para o modelo com janela voltada a sul o sol tende a iluminar diretamente uma porção menor do ambiente, mais próximo à janela, o que não acontece no modelo com janela orientada a leste, onde grande parte do ambiente, em metade do dia, recebe insolação.

Quadro 6 - Disposição da malha de pontos utilizada na primeira fase do estudo em cada modelo.

Malha	Total de Pontos	Largura do Setor (m)	Área do setor (m ²)	Distância à parede (m)	Atende a:	
					NBR 15215-4 ³	IES LM-83-12 ⁴
2 x 2	4	3,00	9,00	1,50	Menor	Menor
3 x 3	9	2,00	4,00	1,00		
4 x 4	16	1,50	2,25	0,73		
5 x 5	25	1,20	1,44	0,60	Sim	
6 x 6	36	1,00	1,00	0,50		
7 x 7	49	0,86	0,74	0,48	Maior	
8 x 8	64	0,75	0,56	0,38		
9 x 9	81	0,67	0,44	0,33		Sim
10 x 10	100	0,60	0,36	0,30		
11 x 11	121	0,55	0,30	0,27		Maior
12 x 12	144	0,50	0,25	0,25		
13 x 13	169	0,46	0,21	0,23		
14 x 14	196	0,43	0,18	0,22		
15 x 15	225	0,40	0,16	0,20		

Fonte: Elaborada pelo autor

A cidade de Maceió, capital do estado de Alagoas, é uma cidade litorânea de clima tropical úmido localizada a latitude 9°40'S e longitude 35°44'O. Possui temperatura média anual de 25,1°C e umidade relativa média anual de 77,8%. O céu de Maceió possui nebulosidade média anual de 0,7 décimos, variando entre 0,6 e 0,8 ao longo do ano (INMET, 2010). Estudo de Cabús (2002) aponta predominância de céu parcialmente encoberto (61,8%) seguido de céu encoberto (25,8%) e claro (12,4%).

Para a simulação nesta etapa computacional foi utilizado o software TropLux 7. O programa permite a modelagem do ambiente na própria interface, bem como a definição das características dos materiais. Para a extração dos dados o próprio programa calcula o valor das métricas, permitindo a definição pelo pesquisador dos valores de referência.

A análise dos resultados foi realizada em duas etapas: exploratória e estatística. Na primeira, os resultados foram avaliados de forma descritiva, sendo calculada a diferença percentual (DP) entre os resultados para a malha analisada e para a malha imediatamente inferior. A EMA e a UMA tiveram suas componentes estudadas separadamente, sendo elas: sol direto (SD), sol refletido (SR), céu direto (CD) e céu refletido (CR), conforme Cabús (2002). A análise exploratória busca verificar o comportamento das variáveis com a mudança a quantidade de pontos, procurando identificar a partir de qual distribuição de malha os resultados apresentam-se com variação não significativa. Para tanto foi adotado o valor de 5%, em que

abaixo dele as diferenças entre médias (DP) podem ser consideradas pouco significativa. O valor de 5% atende ao intervalo de normalidade da curva de distribuição normal de Gauss.

Na segunda, foi feita a análise estatística, separada em duas etapas. Os resultados foram inicialmente avaliados por meio de uma matriz de correlação e significância. Posteriormente foram utilizadas as ferramentas da análise de variância - *One way* ANOVA (Anova de fator único) - utilizada para a comparação de múltiplas médias (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). Para verificar as diferenças significantes entre as médias, como forma de determinar a partir de qual malha as médias dos índices são estatisticamente iguais, foi utilizado o teste de Tukey, que verifica quais as diferenças estatisticamente significantes entre as médias (CALLEGARI-JACQUES, 2003). O teste funciona como complementação da ANOVA, pois se nesta é verificado que as médias do conjunto são diferentes, o teste de Tukey indica quais são elas. Os cálculos foram feitos no software MINITAB® versão 18.0⁵. Para o cálculo da ANOVA e do teste de Tukey a planilha de dados utilizada compreendeu os resultados obtidos dia a dia, hora a hora, para cada uma das componentes da luz natural.

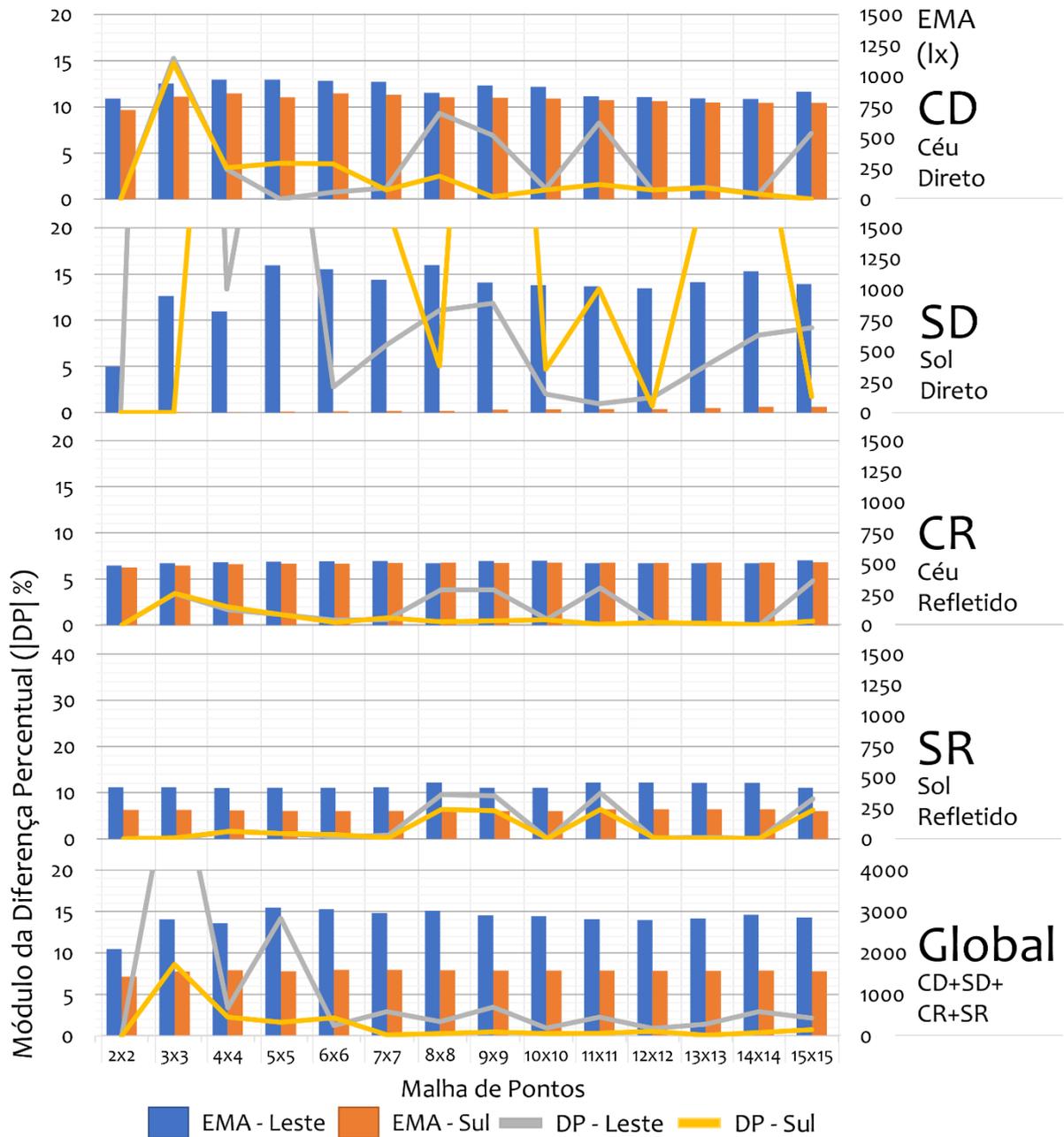
4.2 Fase 1: Resultados e análises

Inicialmente foram avaliados os resultados da EMA por componente. Também foi calculada a diferença percentual (DP) entre o valor obtido para cada malha e o de malha imediatamente inferior. Na Figura 26 é possível verificar graficamente os resultados das simulações separados por componente.

Observa-se que a parcela de luz refletida, seja do sol ou do céu, demonstra tendência semelhante nas duas orientações estudadas, tendo comportamento uniforme, ao passo que a malha de pontos aumenta. Até a malha de 7x7 os resultados mostraram variação percentual menor que 5%, já nas malhas com configuração de pontos entre 8x8 e 11x11 observa-se ligeira mudança na tendência observada, com valores de DP alcançando os 10%. Vale ressaltar que essa mudança é resultado de variações pequenas nos valores de EMA que serão importantes nas análises estatísticas posteriores. Mesmo com essa variação observa-se a estabilização dos resultados já nas malhas de 3x3 pontos com as intercorrências citadas.

⁵ O Minitab é um software utilizado para estudos estatísticos desenvolvido em 1972 e continuado pela Minitab INC State College, PA EUA.

Figura 26 - Gráficos de iluminância média anual (EMA) global e suas componentes. A escala do eixo de DP foi mantida igual em todos os gráficos para facilitar a comparação. Alguns gráficos possuem picos além do intervalo do eixo, mas não comprometem a análise dos resultados.



Fonte: Elaborada pelo autor

As componentes de luz direta, seja do sol ou do céu, apresentaram comportamento distinto, mantendo grande variação percentual com o aumento da quantidade de pontos, principalmente na componente de sol direto. Para os modelos com janela orientada a sul observa-se pequena de variação nos resultados, com estabilização da EMA já na malha de 3x3. Na orientação leste, observa-se a estabilização da iluminância a partir da malha 4x4 com alguns eventos de DP próximos aos 9% em algumas malhas. Quando analisada a componente de sol direto, observa-se grande alteração com o aumento da malha de pontos. Não é possível verificar

comportamento constante na diferença percentual para os modelos analisados, indicando que essa componente deverá precisar de mais pontos para manter comportamento estável da EMA.

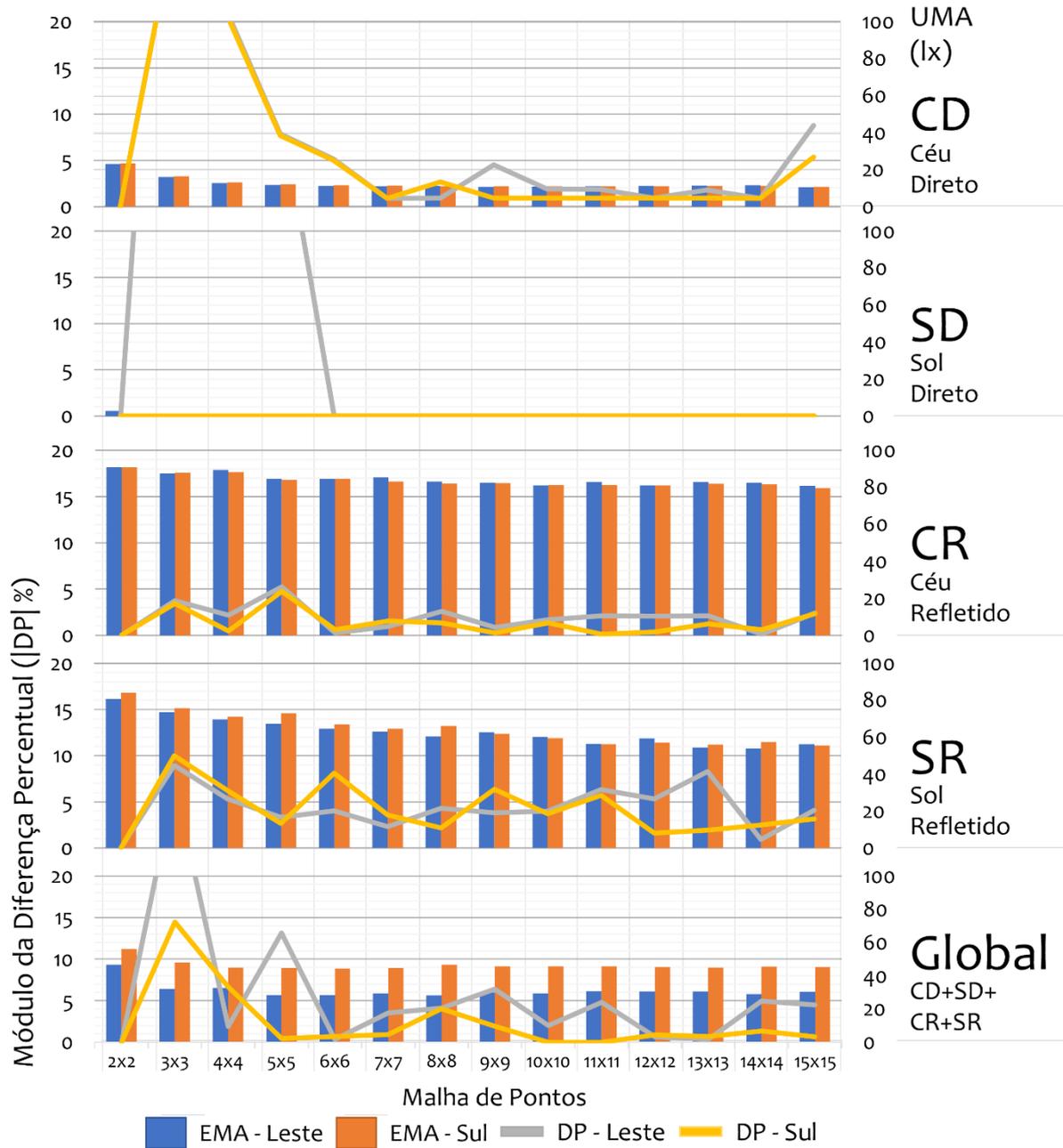
Uma síntese dos resultados pode ser observada no gráfico da iluminância global, que é a somatória de todas as componentes. Nesse quadro percebe-se a tendência de manutenção da diferença percentual menor que 5% na malha de 4x4 na orientação sul, e de 6x6 na orientação leste. Esse comportamento esconde o fato de que, analisadas separadamente, as componentes têm variações distintas e que para o cálculo da luz direta faz-se necessária a simulação de mais pontos por eixo a fim de se obterem resultados com grau de precisão suficiente para a melhor aplicação das métricas de desempenho.

A UMA também foi analisada por componente, cujos gráficos dos resultados são apresentados na Figura 27. Observa-se que apenas a componente de luz do céu refletida apresenta diferença percentual menor que 5%, em todos os cenários estudados. Importante destacar que, em todos os casos, a componente direta da UMA apresenta um resultado com grande variação até um determinado ponto, que corresponde à malha de 6x6, e depois há uma estabilização com valores de DP sempre abaixo de 5%. Já na uniformidade para a componente refletida a parcela do sol possui grande variação, assumindo estabilidade dos resultados apenas para malhas com mais pontos, o que não acontece na parcela de céu.

Para o estudo da UMA da luz do sol, seja direta ou refletida, é preciso remeter-se diretamente ao comportamento da EMA apresentado anteriormente. A luz solar direta apresenta grande variabilidade mesmo com o aumento da quantidade de pontos por eixo. Entretanto, não há variação da uniformidade na orientação sul, em todos os cenários estudados, o que reafirma a necessidade de uma malha mais densa para a determinação da iluminância. Para orientação leste, observa-se estabilização da uniformidade, com seis pontos por eixo.

O comportamento distinto da UMA, nas duas orientações, justifica-se pelo fato de que, na orientação sul a trajetória aparente do sol faz com que a região do plano de trabalho que recebe luz direta do sol esteja restrita a uma porção perto da janela, enquanto que no ambiente com janela voltada a leste, praticamente todo o plano de trabalho recebe luz solar direta, em algum instante do ano, na parte da manhã. A avaliação da UMA global permite observar que, para a orientação sul o ambiente tem variação percentual da uniformidade menor que 5%, a partir da malha de 4x4, o que só vai acontecer na orientação leste a partir da 6x6.

Figura 27 - Gráficos de Uniformidade média anual (UMA) global e suas componentes. A escala do eixo de DP foi mantida igual em todos os gráficos para facilitar a comparação. Alguns gráficos possuem picos além do intervalo do eixo, mas não comprometem a análise dos resultados.

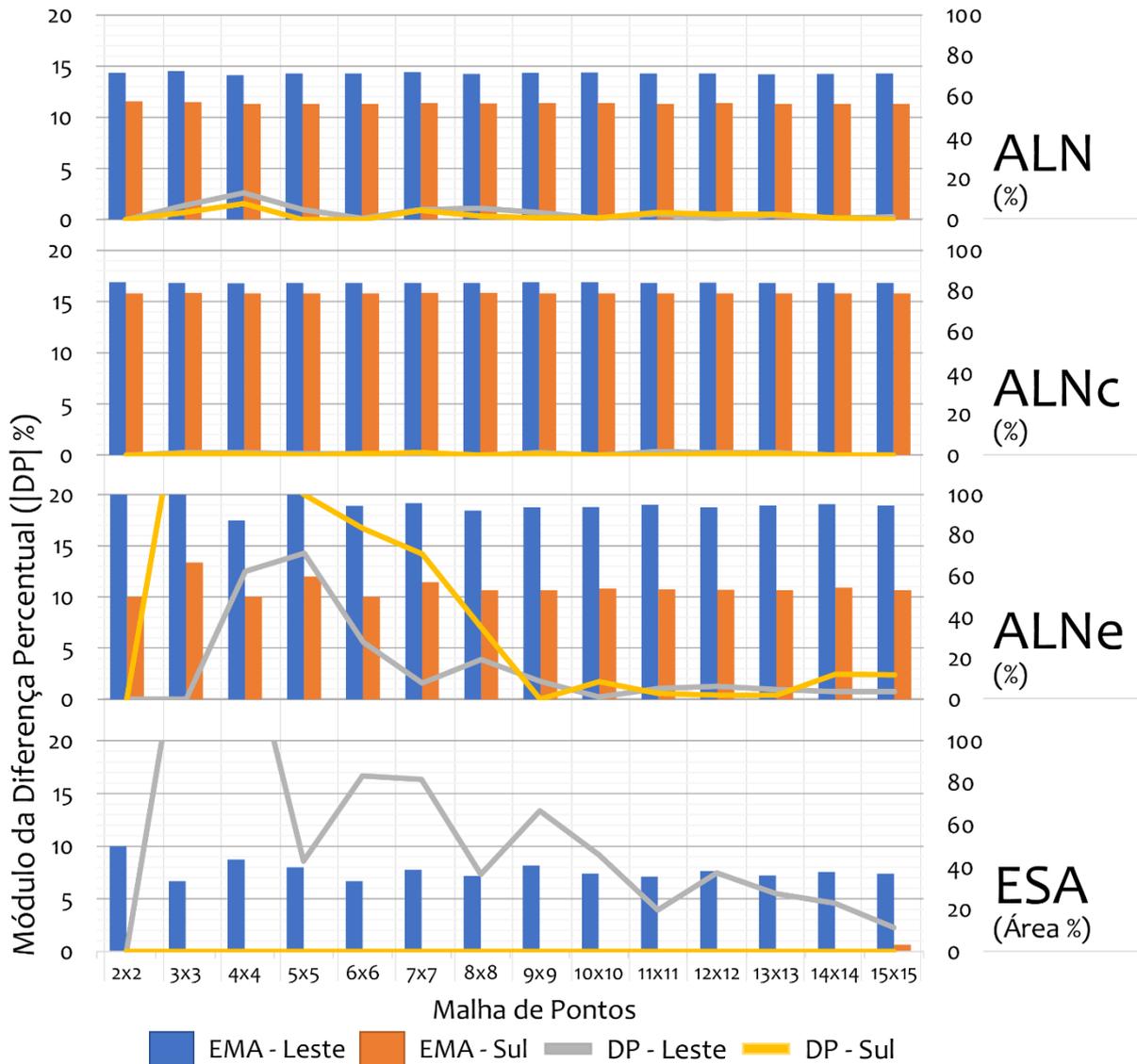


Para o estudo da IULN e da ALN e suas derivadas, não foram feitas distinções entre as componentes, tendo em vista que a aplicabilidade dos conceitos só existe na análise da iluminância global. Com relação à ESA, conceitualmente, apenas a iluminância solar direta é estudada. Os gráficos dos resultados para as ALN e para a EMA são apresentados na Figura 28.

Verifica-se inicialmente que o comportamento da ALN e da ALNc são próximos, tendendo a manter-se estáveis independente da variação da malha, entretanto, a ALNc assume

valores maiores tendo em vista sua forma de cálculo. De forma geral os modelos orientados a sul obtiveram os menores valores de métricas se comparados àqueles com janela orientada a leste, principalmente pelo fato de que nessa última há maior penetração solar em alguns instantes do dia.

Figura 28 - Gráficos das métricas ALN, ALNc, ALNe e ESA. A escala do eixo de DP foi mantida igual em todos os gráficos para facilitar a comparação. Alguns gráficos possuem picos além do intervalo do eixo, mas não comprometem a análise dos resultados

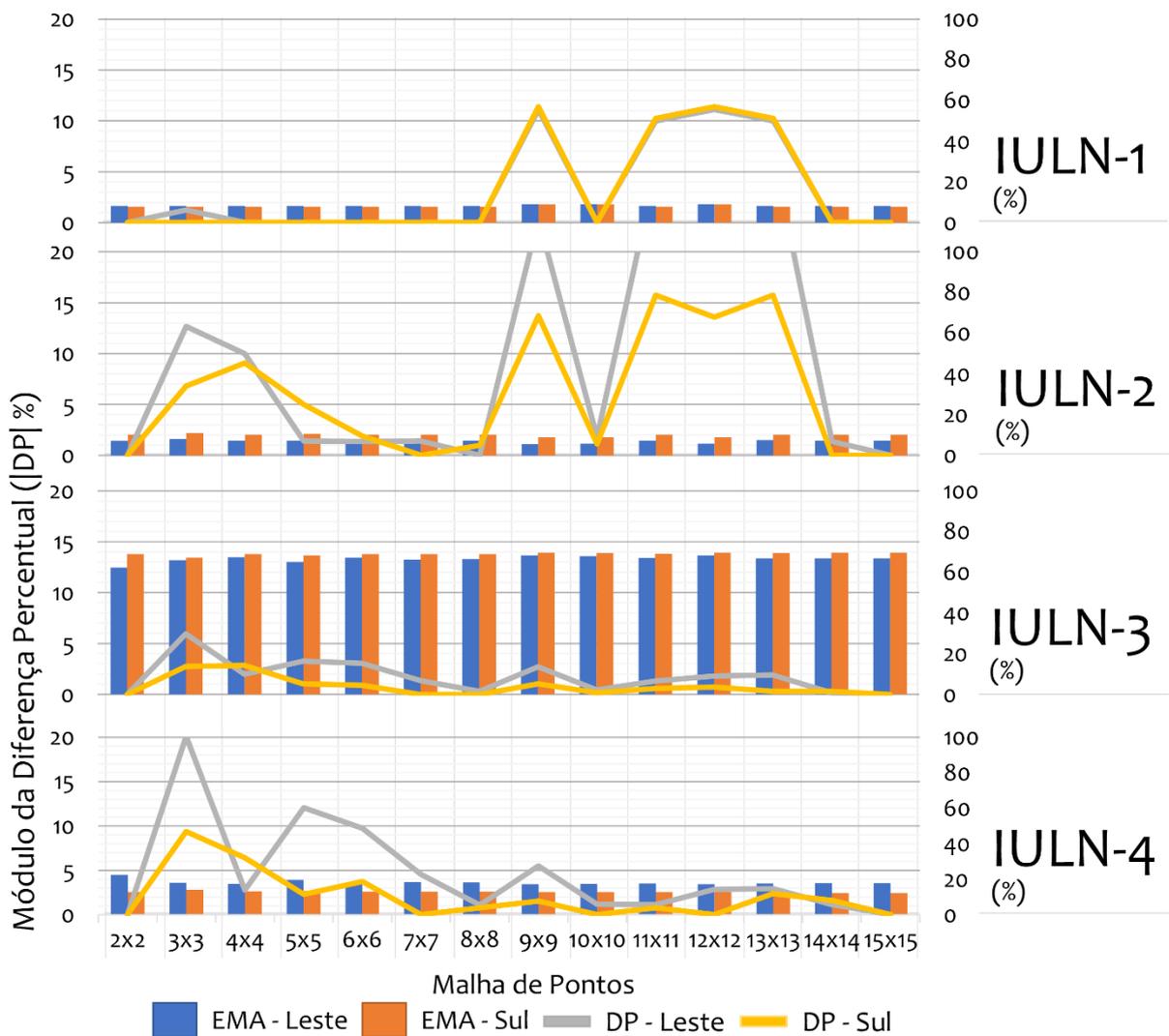


Fonte: Elaborada pelo autor

Os gráficos da ALN e da ALNc apresentaram pouco desvio em relação à média e uma tendência de estabilização dos seus valores, mas não é suficiente para afirmar que a quantidade de pontos no plano de trabalho não influencia o cálculo desses índices. A grande disponibilidade de luz natural encontrada na cidade, utilizada nas simulações faz com que a quantidade de luz no ambiente seja suficiente para atingir o valor de referência na maioria dos instantes.

Quando a ALNe é avaliada ao longo de todo o ano sua variação se apresenta mais evidente. Para as duas orientações, as malhas menores, de até 7x7, mostraram DP expressiva, tendendo a apresentar pequena diferença, a partir de oito pontos por eixo para ambas as orientações. Outro fator que exibiu grande variação foi a ESA. O gráfico mostra que apenas para os modelos com malhas maiores que 14 pontos por eixo os resultados tendem a se estabilizar com a alteração da malha, ou são perceptíveis, como no caso da orientação sul, admitindo uma diferença de 4%. A inexistência de valores de ESA na orientação sul para malhas menores que 15x15 indica que o estudo da luz direta do sol necessita de uma malha com mais pontos para identificar corretamente a influência do sol na métrica. Os gráficos dos resultados para IULN são apresentados na Figura 29.

Figura 29 - Gráficos das faixas de IULN. A escala do eixo de DP foi mantida igual em todos os gráficos para facilitar a comparação. Alguns gráficos possuem picos além do intervalo de do eixo, mas não comprometem a análise dos resultados



Fonte: Elaborada pelo autor

Os gráficos de IULN apresentaram variação significativa da diferença percentual em malhas com mais pontos por eixo nas faixas 1,2 e 4. Para a faixa 1 os resultados permanecem com DP menor que 5% até a malha de 9x9, mas depois apresenta valores maiores que 10%. Já na faixa 2 os resultados variam em todos os tipos de malha sendo difícil identificar estabilidade. Na faixa 3, a de maior interesse para aproveitamento da luz natural, observa-se uma diferença percentual menor que 5% em quase todas as malhas estudadas.

Os resultados da faixa 4 da IULN estão relacionados diretamente com a entrada de luz direta no ambiente, por isso se assemelha principalmente ao comportamento da uniformidade de tal componente da luz natural. Observa-se grande variação em malhas com menos pontos e estabilização a partir das malhas de 6x6 pontos.

Na análise exploratória foi possível perceber que certos parâmetros são mais facilmente influenciados pela quantidade de pontos do que outros, mas que todos, em algum grau, exercem influência, a exemplo da ESA e a ALNe, que são claramente afetadas pela escolha dos pontos. O comportamento dos cenários pode ser dividido também pela orientação, outro fator importante na decisão. Importante notar que a quantidade de sol direto que entra nos ambientes influencia diretamente os índices de desempenho da iluminação natural e, conseqüentemente, a escolha da malha de pontos adotada. O fato indica que há uma relação entre a área da janela, sua posição e a distância até ela na escolha da malha de pontos de análise. Os parâmetros de ALNe e ESA apresentaram maior sensibilidade à variação, necessitando o primeiro de uma malha de 7x7 e o segundo de 15x15 para estabilização dos resultados.

A fim de validar as inferências anteriores, os dados foram analisados com a matriz de correlação utilizando dois parâmetros de comparação: a quantidade de pontos por eixo (PPE) e a área por setor. Um resumo é apresentado na Tabela 2. É importante notar que a área do setor mostrou correlações mais fortes do que a quantidade de pontos, principalmente em orientações com maior entrada de sol ao longo do ano, indicando a área como um parâmetro relevante na escolha da malha de análise.

Para a EMA, as componentes de céu direto e sol refletido foram as que não alcançaram valores de correlação com a área ou PPE altos. Entretanto, as componentes de sol direto e céu refletido apresentaram correlações expressivas. A luz advinda do sol de forma direta apresentou forte correlação com a malha e significância em ambas as orientações. Já a do céu refletido foi determinante apenas para a janela voltada a sul. Observa-se ainda que os destaques apresentados estão concentrados nas componentes de EMA e UMA, que quando analisadas globalmente,

independente da orientação, apresentaram os maiores valores de correlação e os menores de significância.

Tabela 2 - Síntese da matriz de correlação para os dados nas duas orientações estudadas. A legenda das cores consta no final da tabela

		Orientação Leste				Orientação Sul			
		Correlação		Significância		Correlação		Significância	
		PPE	Área	PPE	Área	PPE	Área	PPE	Área
EMA	CD	-0.55	-0.08	0.04	0.78	-0.26	-0.47	0.37	0.09
	CR	0.24	-0.61	0.41	0.02	0.79	-0.98	0.00	0.00
	SD	0.47	-0.88	0.09	0.00	0.98	-0.58	0.00	0.03
	SR	0.55	-0.34	0.04	0.24	0.25	0.02	0.37	0.94
	Global	0.36	-0.84	0.25	0.00	0.35	-0.99	0.23	0.00
UMA	CD	-0.63	0.98	0.02	0.00	-0.55	-0.08	0.04	0.78
	CR	-0.87	0.84	0.00	0.00	0.24	-0.61	0.41	0.02
	SD	-0.45	0.89	0.11	0.00	0.47	-0.88	0.09	0.00
	SR	-0.93	0.87	0.00	0.00	0.55	-0.34	0.04	0.24
	Global	-0.49	0.93	0.08	0.00	0.33	-0.84	0.25	0.00
Métricas	ALN	-0.10	0.05	0.74	0.86	-0.47	0.53	0.09	0.05
	ALN _c	-0.17	0.32	0.24	0.26	-0.25	0.13	0.36	0.66
	ALN _e	-0.31	0.51	0.29	0.06	-0.23	0.02	0.42	0.95
	IULN - 1	0.24	-0.26	0.41	0.37	0.24	-0.26	0.41	0.37
	IULN - 2	-0.33	0.33	0.25	0.25	-0.33	0.33	0.25	0.25
	IULN - 3	0.43	-0.78	0.13	0.00	0.54	-0.13	0.05	0.66
	IULN - 4	-0.55	0.79	0.04	0.00	-0.57	0.24	0.03	0.41
	ESA	-0.42	0.66	0.13	0.01	0.45	-0.14	0.11	0.64

Correlação Significância

-1 0 1 <0.05

Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores pouco expressivos encontrados nos demais índices de avaliação do desempenho da luz natural, indicam que o seu cálculo está diretamente relacionado à correta definição dos parâmetros na Iluminância e na Uniformidade. Apenas a IULN nas faixas 3 e 4 apresentaram, mesmo que pequena, alguma correlação para a orientação leste, com maior entrada de luz solar. Esse resultado, associado à maior presença de correlações significativas indica que a orientação com maior entrada de luz solar direta é aquela em que a área de

influência dos pontos de análise deve ser definida de forma mais cuidadosa, implicando maior precisão dos resultados. Para a orientação sul, em que a entrada de luz solar é menor, ainda assim faz-se necessário esse mesmo cuidado. A ocorrência de valores de ESA em alguns modelos voltados a sul fez com que a correlação não se apresentasse significativa, entretanto, na orientação leste, onde houve ocorrência de ESA, foi obtido um valor de correlação maior.

A matriz de correlação não consegue verificar as variações dia a dia, já que trabalha apenas com o valor médio anual. Para tanto as análises de ANOVA e teste de Tukey foram realizadas utilizando dados mensais para a iluminância (E) e uniformidade (U). A síntese dos resultados é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Síntese da ANOVA e do teste de Tukey apresentando os agrupamentos de cada componente. As células azuis na coluna Índice indicam os testes de ANOVA que apontaram diferença entre as médias. As células verdes em destaque indicam o ponto de estabilidade das médias.

		ANOVA / Índice	Malha													
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Leste	E	CD	B	AB	A	A	A	A	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
		CR	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		SD	C	AB	B	A	A	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
		SR	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	U	CD	A	B	C	D	E	EF	HI	HI	G HI	IJ	G HI	FG H	EF G	J
		CR	A	C	B	D	D	D	E	E	G HI	EF	FG	EF	EF G	G
		SD	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
		SR	A	B	C	C	D	DE	DE F	DE	EF G	G H	FG H	H	H	H
Sul	E	CD	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		CR	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		SD	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		SR	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	U	CD	A	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
		CR	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		SD	A	B	B	C	C	CD	DE	DE	E	E	E	E	E	F
		SR	A	AB	BC	BC	BC D	BC DE	BC DE	CD E	DE	DE	DE	E	DE	E

Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados da ANOVA são apresentados na coluna dos índices, na qual aquelas marcadas em azul foram aquelas em que o teste indicou que as médias são estatisticamente diferentes, cujo resultado do teste de Tukey permitiu identificar os agrupamentos. Os valores

em destaque no teste de Tukey correspondem ao ponto em que, a partir dele, os resultados são estatisticamente iguais entre si, indicando que os valores de iluminância assumiram estabilidade estatística. Os testes apontam definições importantes que ratificam as encontradas na análise exploratória inicial. Para a janela orientada a sul, as alterações de iluminância não foram grandes o suficiente para que os resultados da análise estatística apontassem relação entre ela e a malha de pontos. Entretanto, para a uniformidade, foram encontradas relações.

O agrupamento de Tukey indica que, para estabilizar a média da uniformidade na janela orientada a sul, são necessárias malhas de 4x4 (distância entre pontos de 1,5m e área do setor de 2,25m²) na componente de céu direto (CD), e 10x10 (área do setor de 0,36m²) nas componentes de céu refletido (CR) e sol refletido (SR). Estas duas componentes apresentaram eventos que alteraram os valores na malha de 15x15, em que houve uma redução ou um pico repentino. Os eventos indicam a necessidade de avaliações com malhas de mais pontos. Para esta orientação, a componente refletida apresentou necessidade de mais pontos que a componente direta.

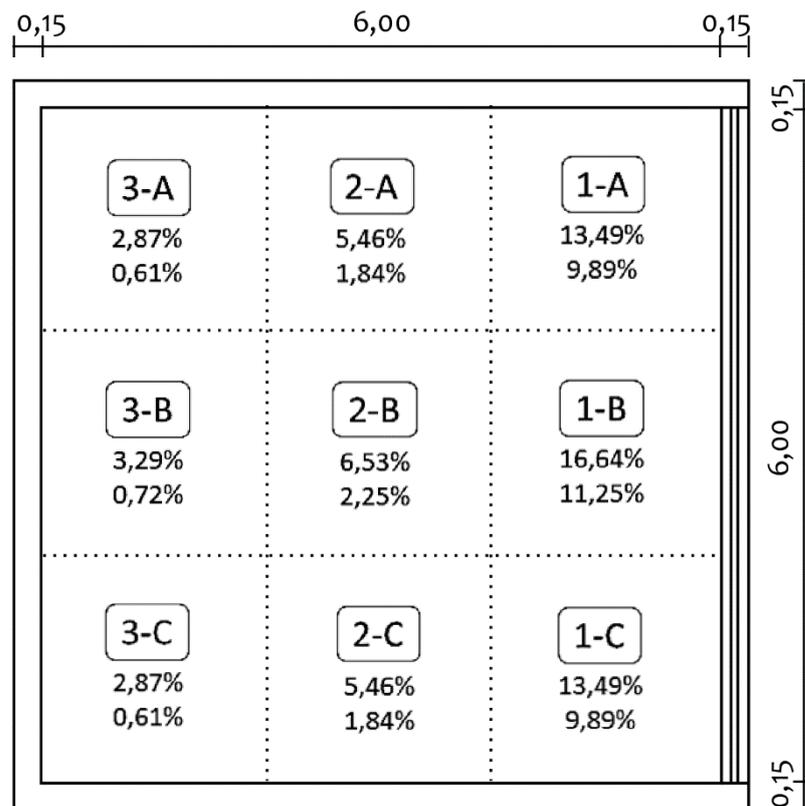
Para a janela orientada a leste, a malha para estabilizar a média da iluminância varia entre 8x8, para a componente de céu direto, e 7x7 para a de sol direto. As demais componentes estabilizaram suas médias na menor malha, de 2x2. Para a uniformidade, os resultados foram distintos em cada componente da luz, onde as malhas variam entre 3x3 (área do setor de 4m²) na componente de sol direto, passando por 10x10 para as componentes de céu direto e refletido e indo até 13x13 na componente de sol refletido (área do setor de 0,21m²). Nas componentes de céu, aconteceram eventos de queda brusca nos valores para a malha de 15x15, o que reforça a necessidade de análises com malhas mais refinadas. A avaliação qualitativa da componente de sol refletido mostrou grande variação e tendência de não estabilização da média, o que é ratificado pelos resultados da análise estatística.

Os resultados apontam ainda para uma outra questão que se relaciona diretamente com o teste de hipóteses utilizado. Em alguns casos há picos de valores de iluminância média, como no caso das componentes de sol para a uniformidade na orientação sul. Essa ocorrência no fim ou no começo da série deve ser estudada utilizando-se tratamentos de valores espúrios a fim de melhor definir as malhas recomendadas. O tratamento desse tipo de dado será melhor estudado nas próximas etapas da tese.

4.3 Fase 2: Metodologia

Para a segunda fase de estudo foram utilizados os mesmos modelos da fase anterior. Agora o plano de trabalho foi dividido em nove áreas iguais, com 2x2 m, dentro das quais foi variada a quantidade de pontos de análise. A divisão do plano de trabalhos em áreas foi denominada de setorização e o termo será utilizado em todas as análises posteriores. As divisões das áreas são apresentadas na Figura 30.

Figura 30 - Planta baixa com a distribuição de setores utilizada. Em cada setor está informado a sua posição na linha, em caracteres numéricos, e na coluna, em letras. Também são informados o fator de céu ponderado e o fator de visão de céu, respectivamente



Fonte: Elaborada pelo autor

A escolha dos setores busca relacionar o comportamento das métricas com alguns fatores, como a proximidade com a janela e a visão de céu média a partir do setor. Na figura são apresentadas duas grandezas relacionadas a cada setor, a primeira é o fator de visão de céu (FVC) e a segunda o fator de céu ponderado (FCP). O FVC é o percentual da abóbada celeste visível a partir o ponto analisado, já o FCP verifica a influência da região visível a quantidade de luz no ponto. Os valores adotados foram obtidos para o ponto central do setor, assumindo-o como valor médio. A definição dos valores de FVC e FCP para o setor será objeto de análise posterior além da simplificação utilizada nesta etapa.

A escolha dos dois parâmetros, FVC e FCP, se justifica pela diferente proporção de variação em relação à distância à janela. Para cada setor foram realizados processamentos com densidades de pontos diferentes, começando por um ponto no centro do setor até uma malha de seis por seis pontos dentro do setor. A malha dentro do setor foi denominada de malha setorial e o termo será utilizado em todas as etapas posteriores a fim de diferenciar da malha de pontos, que corresponde ao total de pontos no plano de trabalho. A distribuição das malhas setoriais é apresentada no Quadro 7.

Quadro 7 - Malhas de pontos por setor utilizadas na segunda fase.

Malha Setorial	Quantidade de pontos	Malha Total	Quantidade Total	Densidade (pt/m²)
1x1	1	3x3	9	0,25
2x2	4	6x6	36	1,00
3x3	9	9x9	81	2,25
4x4	16	12x12	144	4,00
5x5	25	15x15	225	6,25
6x6	36	18x18	324	9,00

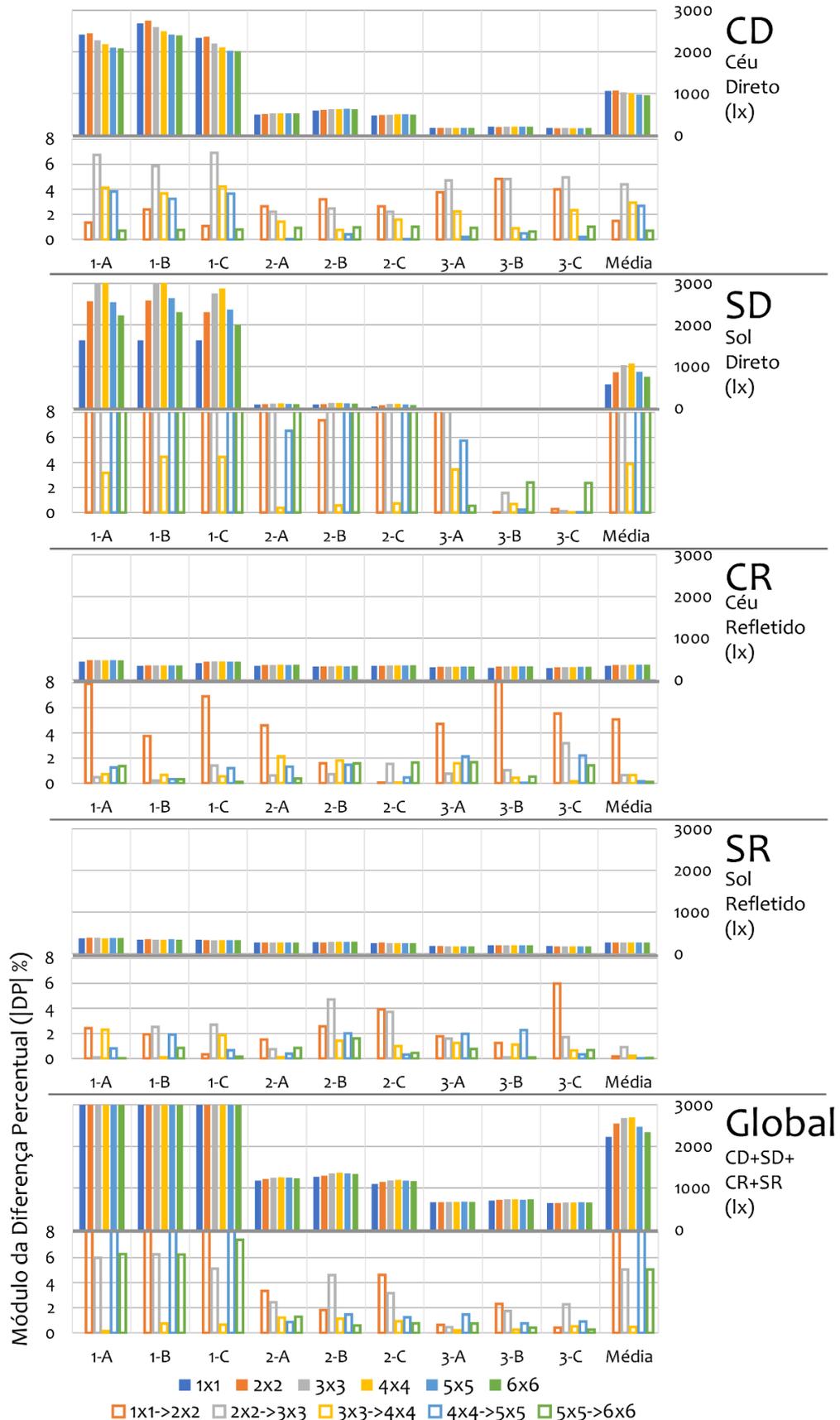
Fonte: Elaborada pelo autor

Os parâmetros de simulação utilizados nesta fase, bem como as métricas avaliadas, foram os mesmos da fase anterior. A análise de dados também foi realizada em duas etapas, onde na primeira foram realizados os estudos exploratórios e na segunda os estudos estatísticos utilizando-se da ANOVA e do teste de Tukey. Na segunda fase, os dados não receberam tratamento por matriz de correlação. Na fase anterior a matriz de correlação não permitiu muitas inferências, sendo mais importante os resultados dos demais testes, os cálculos foram feitos no software MINITAB® versão 19.0. Para o cálculo da ANOVA e do teste de Tukey a planilha de dados utilizada compreendeu os resultados obtidos dia a dia, hora a hora, para cada uma das componentes da luz natural. A análise dos resultados seguiu a mesma ordem da fase anterior.

4.4 Fase 2: Resultados e análises

Os resultados desta fase são apresentados de forma diferente da anterior, tendo em vista o objetivo da análise. Serão apresentados os conjuntos da parte exploratória e da parte estatística separados por orientação, mas mantendo o agrupamento por métrica. Inicialmente foram estudados os resultados da EMA global e suas componentes para os modelos com janela orientada a leste, cujos resultados são apresentados na Figura 31.

Figura 31 - Gráficos de iluminância média anual (EMA) global, suas componentes e a DP para modelos com janela orientada a leste. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise



Fonte: Elaborada pelo autor

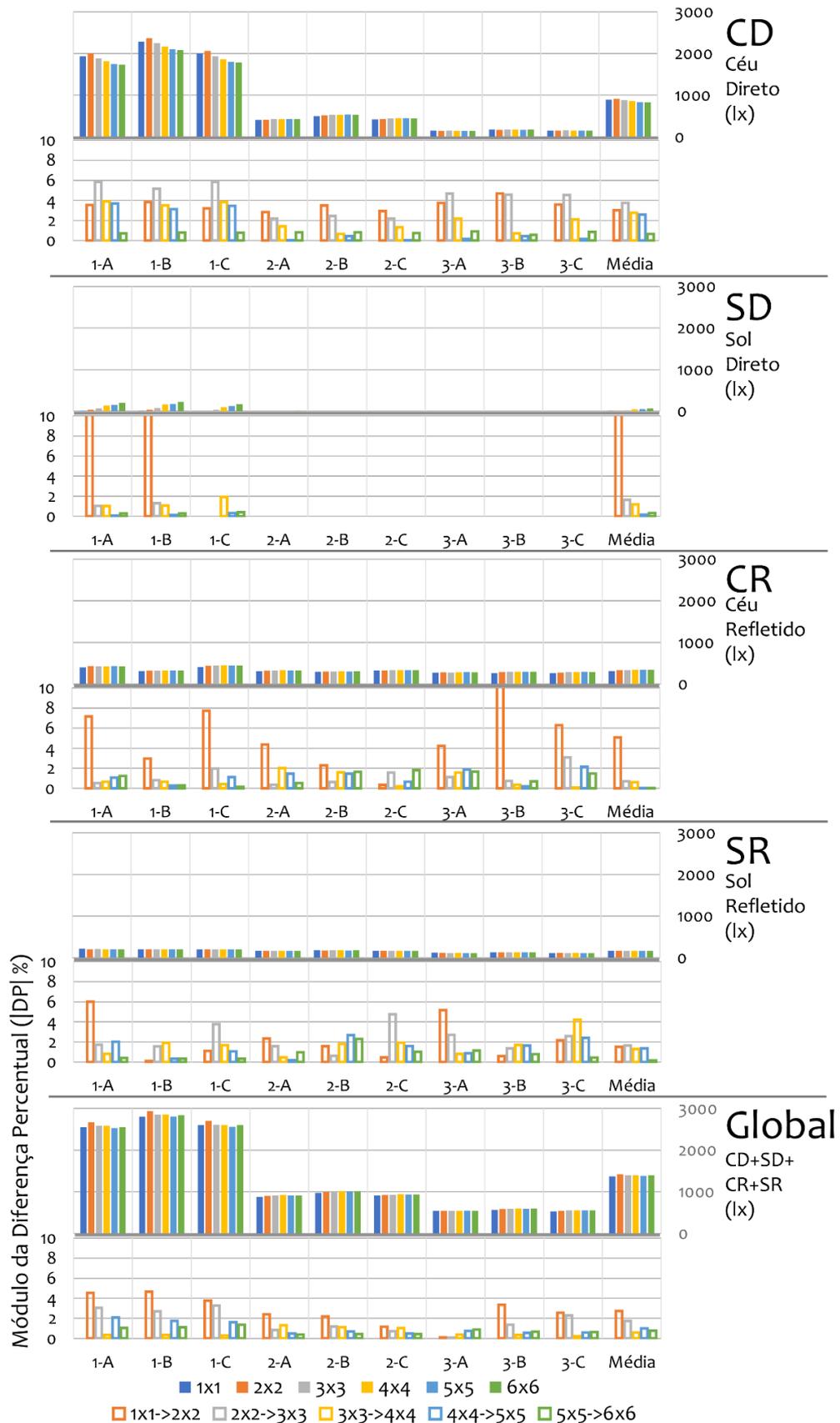
Inicialmente observa-se que os valores de EMA para janela orientada a sul são maiores que os da orientada a leste. Para fins de comparação as escalas dos gráficos foram mantidas iguais, o que faz com que a EMA dos setores mais próximos da janela, no cálculo da global, ultrapassem o limite do gráfico, mas seu comportamento pode ser observado com mais precisão no gráfico da diferença percentual (DP). Os setores mais próximos da janela apresentam um pico na EMA global, refletido pelos valores positivos de DP, que depois se invertem para valores negativos, significando uma redução da EMA nos setores. Os setores que apresentam tal comportamento compreendem aqueles próximos à janela (1-A, 1-B e 1-C), sendo estes mais evidentes, e os da linha central do ambiente (2-A, 2-B e 2-C), com menor evidência, podendo ser observado também na componente de sol direto.

Nas componentes de luz refletida, céu e sol, os valores médios por setor praticamente não se alteram com a mudança de malha setorial, assumindo diferenças percentuais que atingem, no máximo, 2,6%. Em algumas situações, quando há o aumento da malha setorial de 1x1 para 2x2 há uma DP maior que 5%, mas de pouca relevância no comportamento global. Os resultados obtidos nas componentes de luz apresentaram comportamentos distintos entre si. Para a luz do céu vinda de forma direta observa-se uma tendência de redução dos valores com o aumento da densidade. Essa redução pode ser explicada pelo fato de que há, na situação com menor densidade de pontos no setor, apenas um ponto no centro, enquanto que na de maior densidade há 36 pontos (malha setorial de 6x6) com valores muito diferentes entre si. Observa-se a estabilização do valor médio no setor apenas na malha setorial de 5x5 pontos. Os setores do fundo do ambiente apresentam valores de DP pouco expressivos se comparados aos demais.

Quando analisada a componente de sol direto o comportamento indica questões importantes. Inicialmente observa-se um aumento da EMA da componente de sol direto por setor com um comportamento semelhante ao da EMA global. Há um crescimento seguido de um decréscimo, entretanto, sem estabilização do valor. Este comportamento é mais evidente nos setores próximos à janela (1-A, 1-B e 1-C), mas também se observa, de forma menos expressiva, naqueles da linha central (2-A, 2-B e 2-C). Esse comportamento indica que para a situação inicial, de um ponto no setor, algumas regiões receberam insolação direta, mas que só passaram a ser computadas com o aumento da quantidade de pontos no setor. O decréscimo posterior explica-se também pela existência de pontos mais distantes que não recebem insolação e que, mantidos os que recebem, reduzem gradualmente a média global do setor.

Os resultados para a EMA dos modelos com janela orientada a sul são mostrados na Figura 32.

Figura 32 - Gráficos de iluminância média anual (EMA) global, suas componentes e a DP para modelos com janela orientada a sul. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise



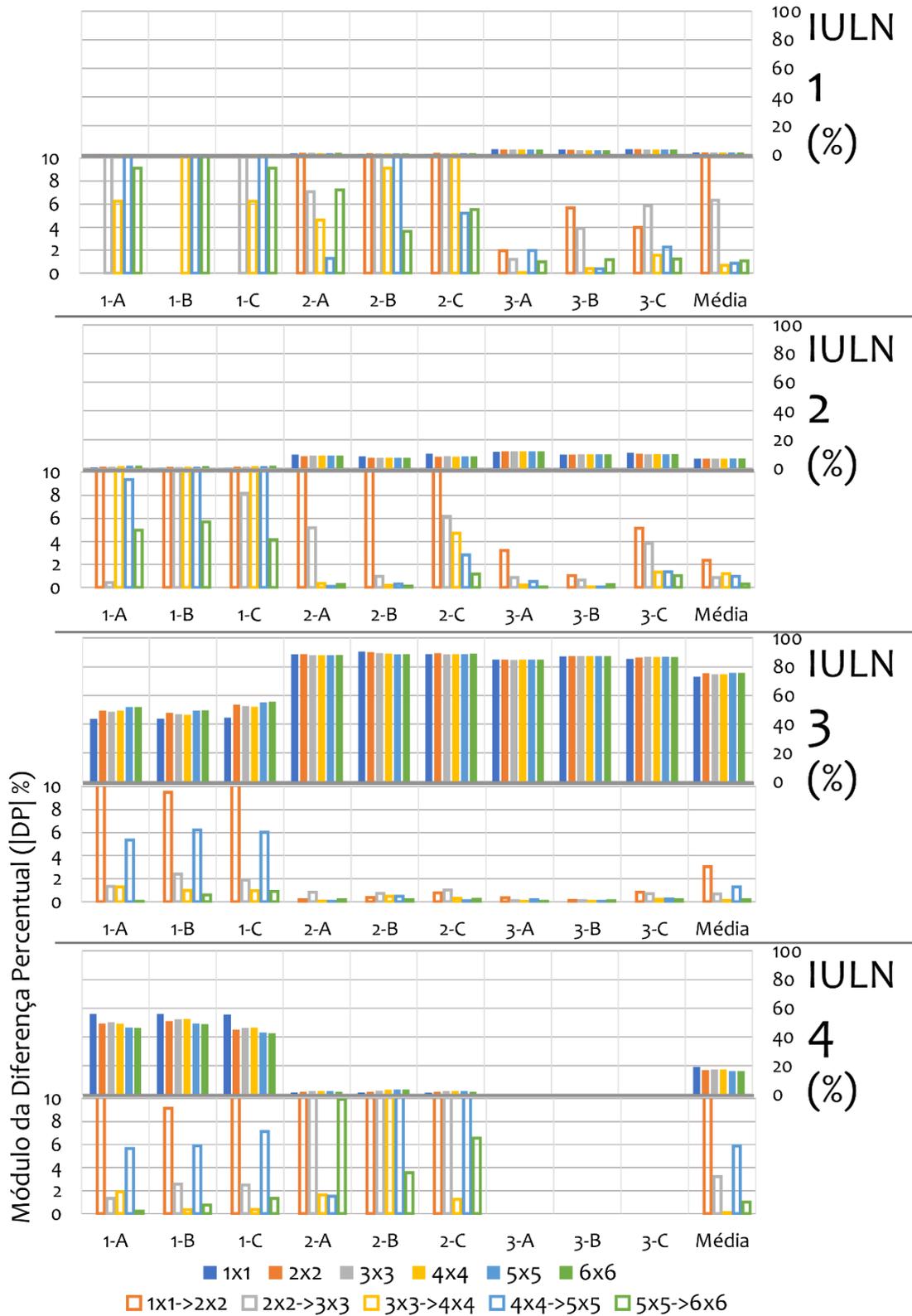
Percebe-se uma diferença de comportamento entre os setores, principalmente nos gráficos da EMA global e nas componentes de luz direta. Os setores mais próximos à janela, principalmente aquele que possui maior visão de céu (1-B), tem os comportamentos, em todas as componentes, distintos com a mudança na densidade dos pontos no setor. Os resultados da EMA global mostram que, na média dos setores, há pouca variação, não chegando aos 5%. Já a análise isolada identifica que os setores mais próximos da janela possuem variações mais evidentes, sendo o 1-B aquele que possui as maiores diferenças percentuais, de até 6%. Nas regiões mais distantes o comportamento é bastante homogêneo. A linha central de setores, que compreende os 2-A, 2-B e 2-C, possui variação global de, no máximo, 2,3% e a do fundo, que compreende os setores 3-A, 3-B e 3-C, de 2,2%. As componentes de luz refletida, seja do sol ou do céu, apresentam pouca variação com a alteração da malha setorial, mesmo nos setores mais próximos à janela, não ultrapassando os 4,7% para o sol e 4,3% para o céu. Aqueles mais distantes da janela apresentaram variação muito pequena, menores que 1,5%.

A componente que apresenta variação de resultado de forma mais expressiva é a de luz direta, principalmente do sol. Nas regiões mais próximas à janela os setores indicam grande variação, de até 30%, entre os resultados para cada modelo. Importante notar que a variação observada em tal componente não apresenta redução, mesmo nas situações de maior densidade de pontos. Para o céu direto os setores mais próximos da janela apresentam grande variação, mostrando uma ligeira estabilização nos resultados nas duas últimas situações de densidade. As variações se mantêm em torno de 6% para os três setores mais próximos a janela. Nos demais setores a variação é pequena, não atingindo 2%. Na média, os valores mantêm diferença percentual em torno dos 3,5% até caírem para 0,6% na última variação.

Tais resultados já apontam que há diferença de comportamento entre as regiões do plano de trabalho e que é possível associar essa diferença principalmente à distância até a abertura. O mesmo comportamento é observado nos modelos com janela orientada a sul. Os resultados para as métricas de desempenho da luz natural apresentam comportamento semelhante aos das componentes de luz natural.

Para o estudo das demais métricas inicialmente foi analisada a iluminância útil de luz natural (IULN) cujos resultados para os modelos com janela orientada a leste são apresentados na Figura 33.

Figura 33 - Gráficos de IULN para os modelos com janela orientada a leste. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados para todas as faixas de IULN apresentadas são pouco expressivos e mostram pequenas variações apenas para os pontos próximos à janela. Nos setores mais ao fundo não se observa diferença percentual maior que 2% em praticamente todos os casos, salvo algumas exceções na faixa 1 que, por serem valores fora da faixa útil, não são considerados.

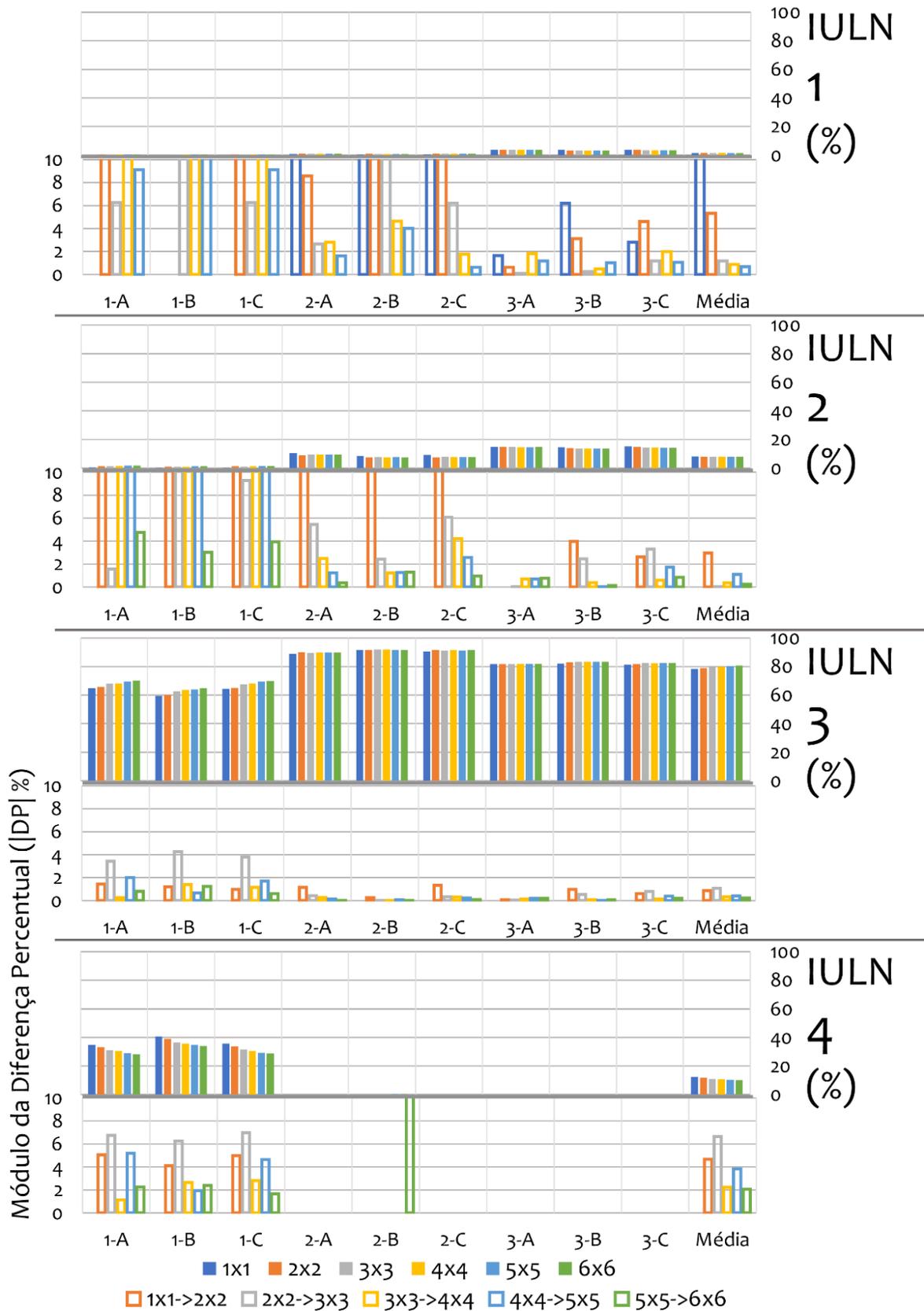
Na faixa 3 observa-se o constante aumento no valor para os três setores mais próximos à janela. Esse aumento é menos expressivo a partir da malha de 5x5 pontos por setor e tem seu pico na malha de 3x3 pontos por setor. O dado mais importante é apresentado na faixa 4, onde os valores tendem a reduzir com o aumento da densidade de pontos. Esse comportamento é o mesmo encontrado na análise por componentes para a componente de céu direto para os mesmos setores. Apenas os setores mais próximos à janela obtiveram valores dentro da faixa analisada, reforçando a necessidade de análise aprofundada dessa região, principalmente quanto a incidência direta de luz.

É possível observar que, em todos os setores estudados, os valores de DP tendem a diminuir com o aumento da malha setorial. Apenas nos setores mais próximos à janela, para a IULN-1 é que tal comportamento não é observado, justificado pelos valores muito pequenos de iluminância. Para as faixas de IULN úteis (2 e 3) a maioria dos setores já apresenta DP menor que 5% para malhas setoriais de 2x2. Para os modelos com abertura orientada a sul os resultados são apresentados na Figura 34.

O comportamento das faixas é semelhante à orientação apresentada anteriormente. Importante notar que a quantidade de luz que cai na faixa 3 é menor, o que é explicado pela maior incidência de sol direto na região, fazendo com que os valores mudem para a faixa 4. Observa-se também que a faixa de setores intermediária (2-A, 2-B e 2-C) apresentaram, mesmo que pequenos, valores na faixa 4 maiores que zero, o que também pode ser verificado pela incidência de sol direto nessas áreas observada anteriormente.

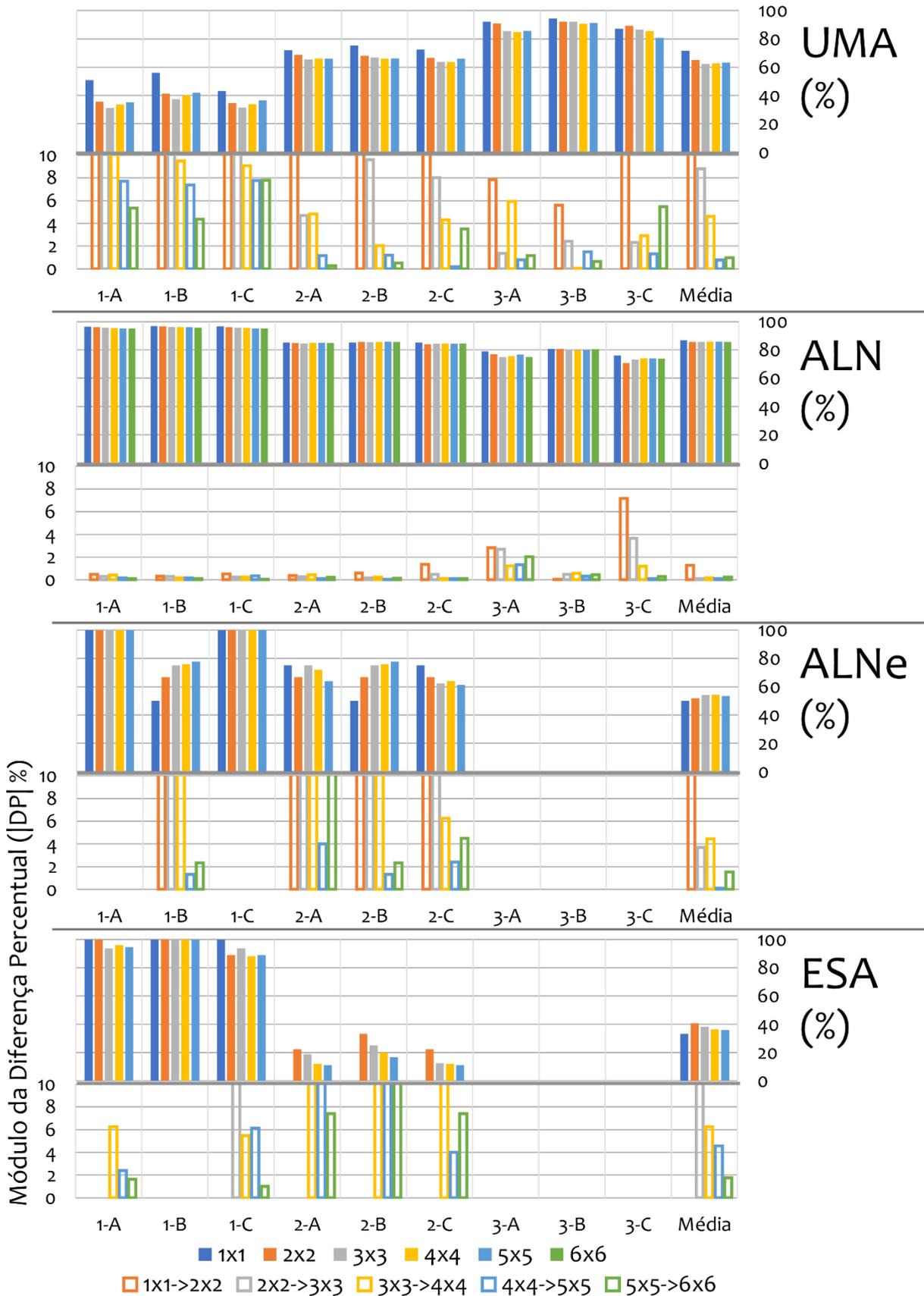
Os resultados das demais métricas utilizadas na análise exploratória (UMA, ALN, ALNe e ESA) para a janela orientada a leste são apresentados na Figura 35.

Figura 34 - Gráficos de IULN para os modelos com janela orientada a sul. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 35 - Gráficos de U, ALN, ALNe e ESA para os modelos com janela orientada a leste. Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise



Fonte: Elaborada pelo autor

Todos os resultados corroboram o fato de que para a janela orientada a leste há maior entrada de luz solar que na orientada a sul, onde a incidência se concentra nos setores mais próximos à abertura. A maior entrada de luz solar reflete-se principalmente nas componentes de sol e avançam para setores mais distantes da janela.

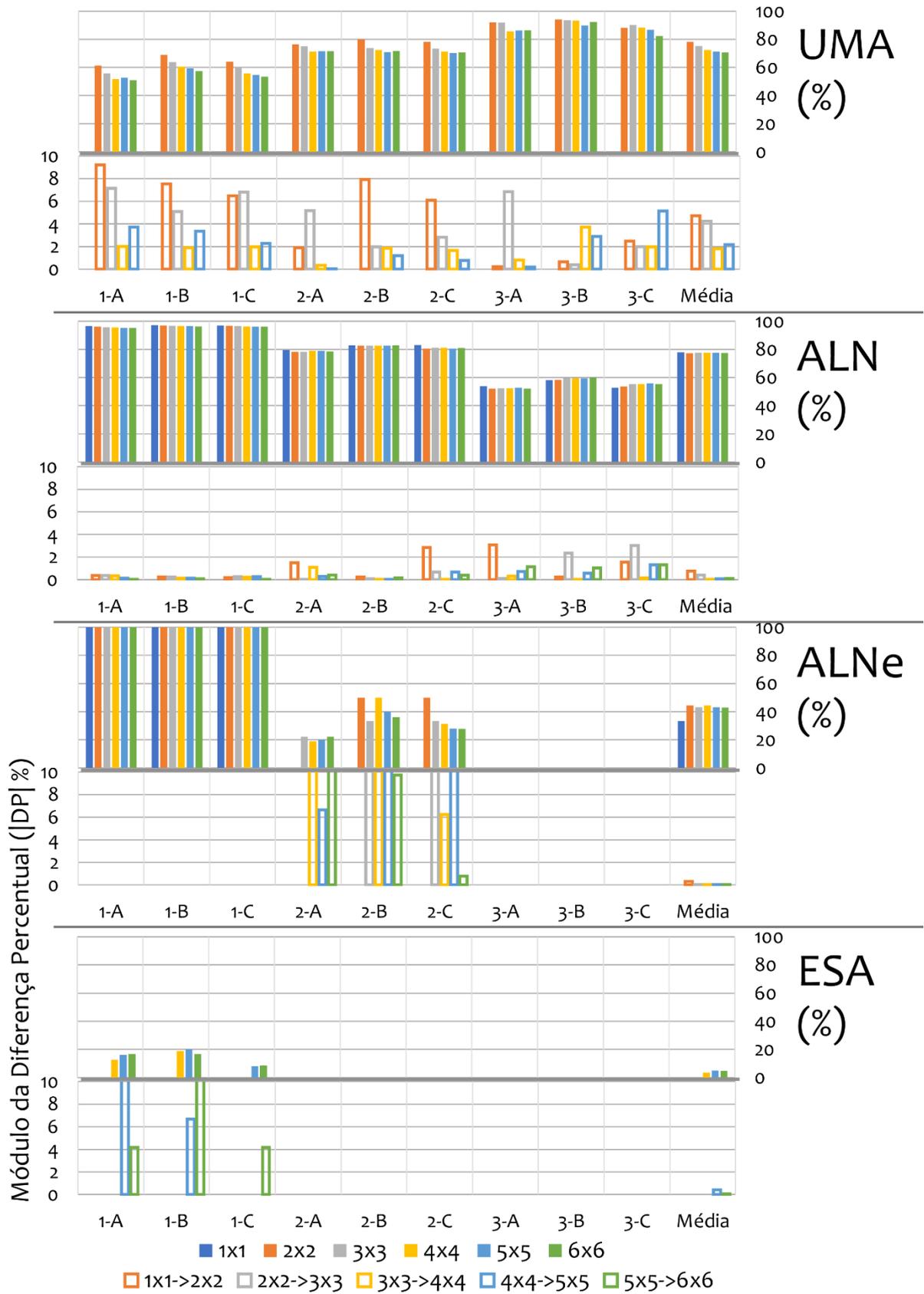
Para os modelos com janela orientada a sul são mostrados os resultados na Figura 36. As métricas refletem o comportamento das componentes de luz natural apresentados anteriormente. A uniformidade da iluminância apresenta um comportamento semelhante em todos os setores, inclusive na média. Os resultados tendem a diminuir, apresentando diferenças percentuais de até 10% nos modelos menos densos e caindo para valores menores que 3% nos modelos mais densos. Para todos os setores observa-se a estabilização dos resultados a partir da malha de 3x3 pontos por setor.

A ALN não apresenta variação expressiva com a mudança da malha setorial. Há uma redução, já esperada, com o distanciamento da janela, que se apresenta de forma compatível com o estudo das componentes. Para a métrica os setores 1-B, 2-B e 3-B, que compreendem o alinhamento do centro do ambiente normal ao plano da janela, atingem valores ligeiramente maiores que os dos setores imediatamente adjacentes, mostrando que mesmo setores com distância horizontal à janela iguais os valores podem diferir por causa da visão de céu diferente em cada um deles.

O resultado da ALNe é pouco expressivo, pois os setores junto à janela atingem valor máximo e os demais apresentam pouca variação percentual entre situações de densidades de pontos diferentes. A ESA obteve resultados pequenos, já esperados pela pouca entrada de luz direta do sol observada nas análises anteriores, entretanto, é importante notar que apenas malhas setoriais maiores que 4x4 por setor obtiveram valores de ESA maiores que zero, o que não acontece em malhas menores. O teste de Tukey verificou que apenas para malhas com mais de 9 pontos por eixo, para o mesmo ambiente, conseguem identificar corretamente os valores de ESA, entretanto, a análise atual mostra que se levado em conta apenas o setor próximo à abertura a malha deverá ser ainda mais densa.

O gráfico da uniformidade tem comportamento inverso ao da iluminância global, com redução dos valores e depois um ligeiro aumento. Para essa métrica observa-se que, para todos os setores, a estabilização dos valores se dá apenas a partir da malha setorial de 5x5 pontos.

Figura 36- Gráficos de U, ALN, ALNe e ESA para os modelos com janela orientada a sul.
Alguns valores de DP ultrapassam a escala adotada, sem prejuízo à análise



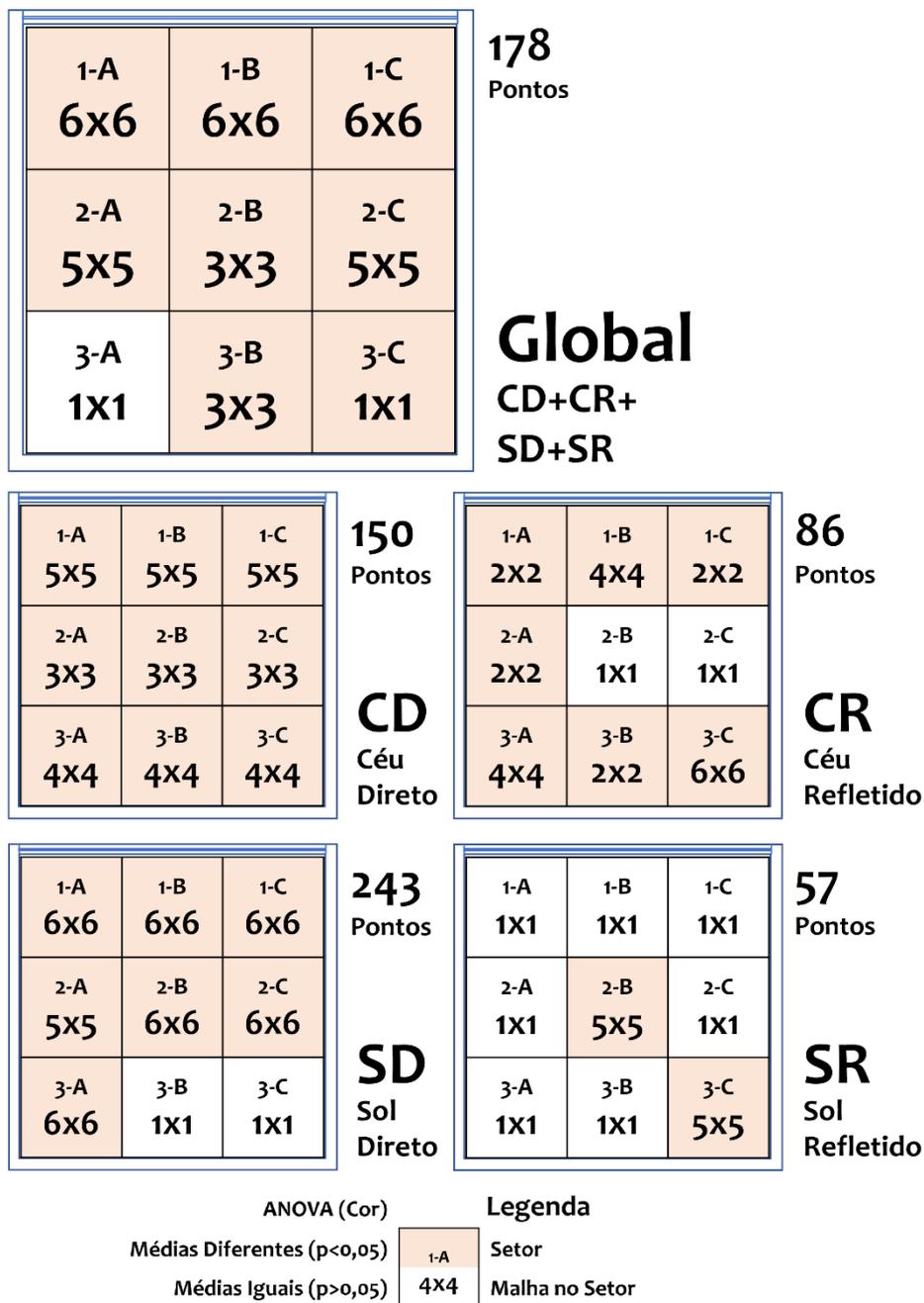
É possível chegar a conclusões parecidas quanto às métricas de ALN, ALNe e ESA para as janelas orientadas a leste e a sul. A principal diferença dos casos é que no primeiro a maior quantidade de luz incidente em partes mais distantes da janela faz com que os valores de ESA nos setores 2-A, 2-B e 2-C sejam maiores que zero. Mesmo assim observa-se, como na IULN faixa 4, que os valores não conseguem apresentar uma estabilização, pois as diferenças percentuais permanecem maiores que 10% mesmo para densidades de pontos maiores. Apenas a ESA dos setores próximos à janela consegue se manter com DP menores que 2% para uma malha de 4x4 pontos por setor.

Os valores obtidos no teste de Tukey para a fase anterior mostram que para malhas maiores que 7x7, para o mesmo ambiente, os valores de ESA são estatisticamente iguais, entretanto, a análise por setor mostra que localmente existem variações que, quando analisadas de forma global, não são observadas. Tal comportamento corrobora ainda com a ideia de que os setores podem ter densidades diferentes sem comprometer o valor final da ESA.

A análise exploratória dos resultados indica que algumas componentes são mais sensíveis à variação na densidade de pontos dentro do setor, principalmente aquelas relacionadas à luz direta, seja do céu ou do sol. As regiões mais próximas à janela, com maior fator de visão de céu, são aquelas onde a alteração da densidade relacionou-se diretamente com a média da componente de luz natural dentro de cada setor. Uma questão importante a se observar é que naquelas janelas onde a trajetória solar aparente permite maior penetração da luz solar direta os setores mais distantes da janela também são afetados, em graus menores, pela variação na densidade de pontos.

Em uma segunda etapa a EMA global e suas componentes foram analisadas estatisticamente, utilizando os testes ANOVA e de Tukey. A apresentação dos resultados seguirá a mesma ordem até então utilizada, separando os conjuntos de dados e análises por orientação e por setor. Os resultados para a ANOVA e o teste de Tukey são apresentados de forma gráfica para a os modelos com janela orientada a Leste na Figura 37.

Figura 37 - Resultados para a ANOVA e o teste de Tukey nos os modelos com janela orientada a Leste para a EMA global e suas componentes



Fonte: Elaborada pelo autor

Para o modelo nessa orientação a penetração de luz solar nas áreas mais distantes da janela é maior, o que foi verificado também na análise exploratória anterior, fazendo com que na ANOVA fosse observado que além dos setores mais próximos da janela (1-A, 1-B e 1-C), aqueles na linha central (2-A, 2-B e 2-C) também obtiveram médias estatisticamente diferentes. A utilização da ANOVA nessa etapa permite verificar que as médias são diferentes, o que acontece na maioria dos casos, entretanto, não permite observar quais são as diferentes entre si

e definir a partir de qual delas o valor se estabiliza e se torna estatisticamente igual. Os resultados do teste de Tukey na fase anterior permitiram a visualização do ponto em que isso acontece e foi utilizado também nessa etapa.

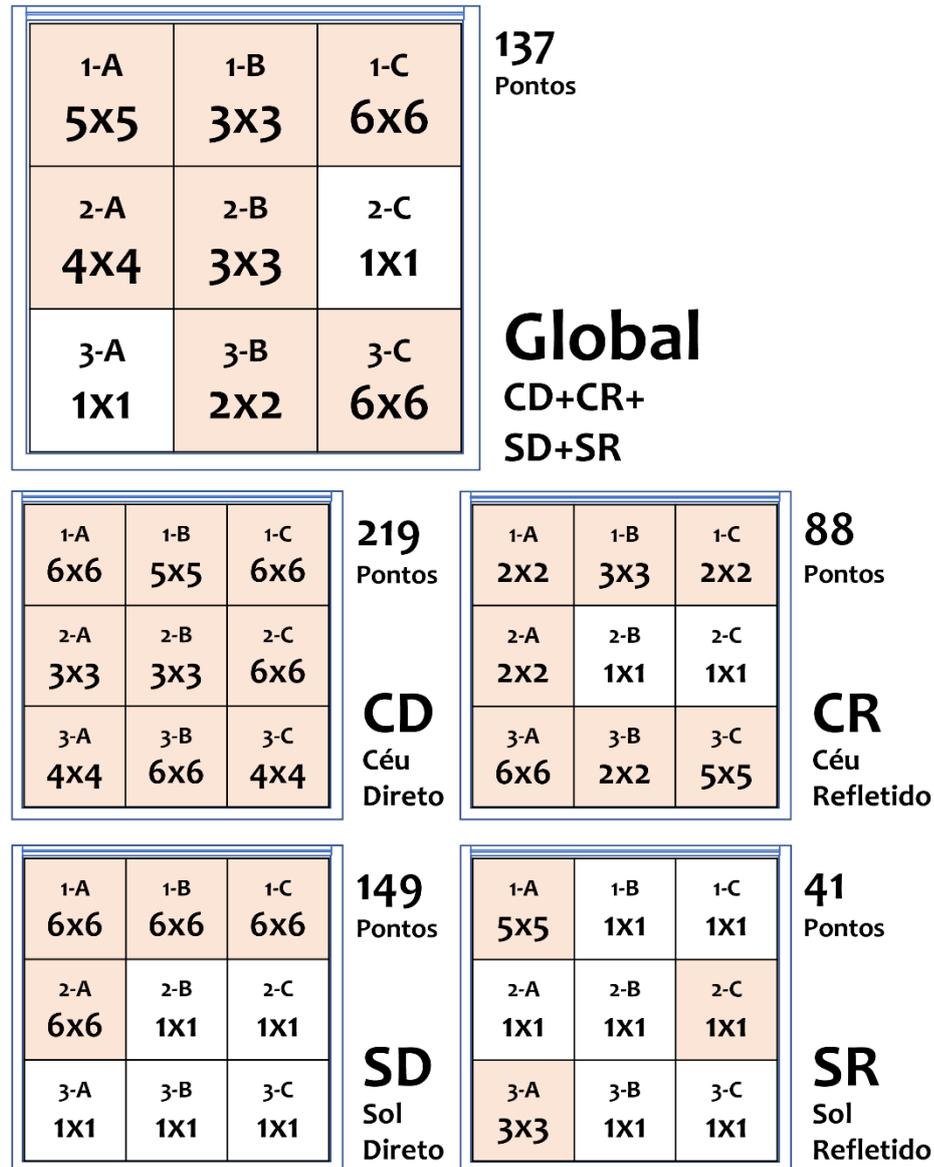
Importante notar que nas análises da ANOVA as duas orientações apresentaram comportamentos semelhantes, diferenciando-as apenas na componente de sol direto. No teste de Tukey os resultados diferiram por orientação. Para EMA global os pontos mais próximos à janela só vão obter médias estáveis a partir da malha de 6x6 pontos por setor, enquanto que aqueles mais distantes da janela a malha de 3x3 pontos já obtêm resultados estatisticamente semelhantes entre si.

Para a componente de céu direto o comportamento dos resultados de agrupamento é bem definido, atingindo médias estatisticamente iguais para uma malha setorial de 5x5 pontos para os mais próximos da janela (1-A, 1-B e 1-C), 3x3 para os setores imediatamente seguintes, e para os do fundo, mesmo que o teste indique a malha de 4x4, os resultados mostram que malhas menores obtêm mesmo resultado. Já a componente de sol direto possui comportamento característico, que já foi observado anteriormente na análise exploratória. A média dos pontos, para uma malha setorial de 6x6, não consegue chegar em médias estatisticamente iguais com a variação da densidade, indicando que talvez sejam necessárias malhas com mais pontos para atingir tal comportamento.

Na componente de luz refletida do céu os setores atingem valores uniformes a partir de malhas setoriais de 2x2, para praticamente todos os setores, salvo algumas exceções que, a partir da análise exploratória, podem ser reconsideradas. O estudo do comportamento na componente de sol refletido aponta que apenas duas obtiveram médias estatisticamente diferentes, mas que não se obteve um valor de constância, apenas a partir da malha setorial de 5x5 pontos, mas mesmo assim sem obter um valor distinto das demais.

Para os modelos com janela orientada a sul os resultados são apresentados de forma gráfica na Figura 38. Para a iluminância global, em apenas dois setores, 2-C e 3-A, as médias são estatisticamente iguais, entretanto, para os demais há diferença entre as médias para o conjunto analisado. Apenas a componente de céu direto, como já observado na análise exploratória, obteve em todos os setores médias diferentes com a variação na densidade de pontos por setor.

Figura 38 - Resultados para a ANOVA e o teste de Tukey nos os modelos com janela orientada a Sul



ANOVA (Cor) Médias Diferentes ($p < 0,05$) Médias Iguais ($p > 0,05$)

Legenda Setor Malha no Setor

Fonte: Elaborada pelo autor

Exceto para a componente de sol refletido, os setores mais próximos à janela (1-A, 1-B e 1-C) obtiveram médias estatisticamente distintas, o que reforça as conclusões da análise exploratória. Para as componentes de luz refletida tanto setores mais próximos da janela, como aqueles mais ao fundo, obtiveram valores que indicam médias estatisticamente diferentes. Para a componente de sol direto apenas os três setores mais próximos à janela obtiveram média estatisticamente diferentes. Nos demais não foi possível calcular o valor da ANOVA tendo em vista que nenhum deles apresentou incidência solar direta.

Os resultados do agrupamento de Tukey para a EMA global apontam que, para os setores próximos à janela (1-A, 1-B e 1-C), as médias são semelhantes entre si, mesmo que sejam estatisticamente diferentes. Um exemplo é o resultado dos setores 1-A e 1-C, que para a malha setorial de 1x1 e 6x6 as médias são estatisticamente iguais, entretanto, entre as duas há uma grande variação que, em momentos se aproxima da situação de menor densidade, noutros se aproxima da de maior densidade. Esse resultado não atesta que a densidade possui pouca influência na média, pois se assim fosse o teste de anova teria apontado uma hipótese verdadeira, mas indica que outros elementos devem ser levados em conta no cálculo desse valor médio que não unicamente aqueles até então agora observados, como o estudo por componentes.

Os demais setores, do meio para o fundo do ambiente, possuem médias distintas entre si, onde os resultados tendem a assumir uma média estatisticamente igual a partir das malhas setoriais de 3x3, em algumas situações, e 4x4 em outras. O setor 3-C foge à regra, apresentando uma média diferente na malha 6x6 que, provavelmente é fruto de algum valor espúrio, como pode ser verificado nos gráficos da análise exploratória. Esse tipo de valor espúrio deve ser melhor estudado, já que foi possível observar diversos casos de picos de iluminância, fazendo com que os testes de hipóteses apontassem malhas setoriais maiores do que realmente são necessárias.

Ao verificar os resultados obtidos para a componente direta da EMA observa-se que os setores 1-A, 1-B e 1-C obtiveram estabilidade nas médias somente a partir da malha de 6x6 no setor, esse mesmo resultado pode ser verificado na componente de sol direto. Tal comportamento reafirma aquele observado na análise exploratória. Para os demais setores, ainda na componente de céu direto, observam-se médias estáveis a partir da malha setorial de 3x3 pontos, o que também reafirma o resultado obtido na primeira fase, que apontou uma malha total de 9x9 para a componente no plano de trabalho completo. As componentes refletidas, seja de céu ou de sol, apresentaram pouca variação de média, comportamento que se reflete em médias estáveis já nas malhas setoriais de 2x2 para o céu e 1x1 para o sol na maior parte dos setores. Mesmo assim ainda se observam situações de valores espúrios, como no setor 3-A da componente de céu refletido.

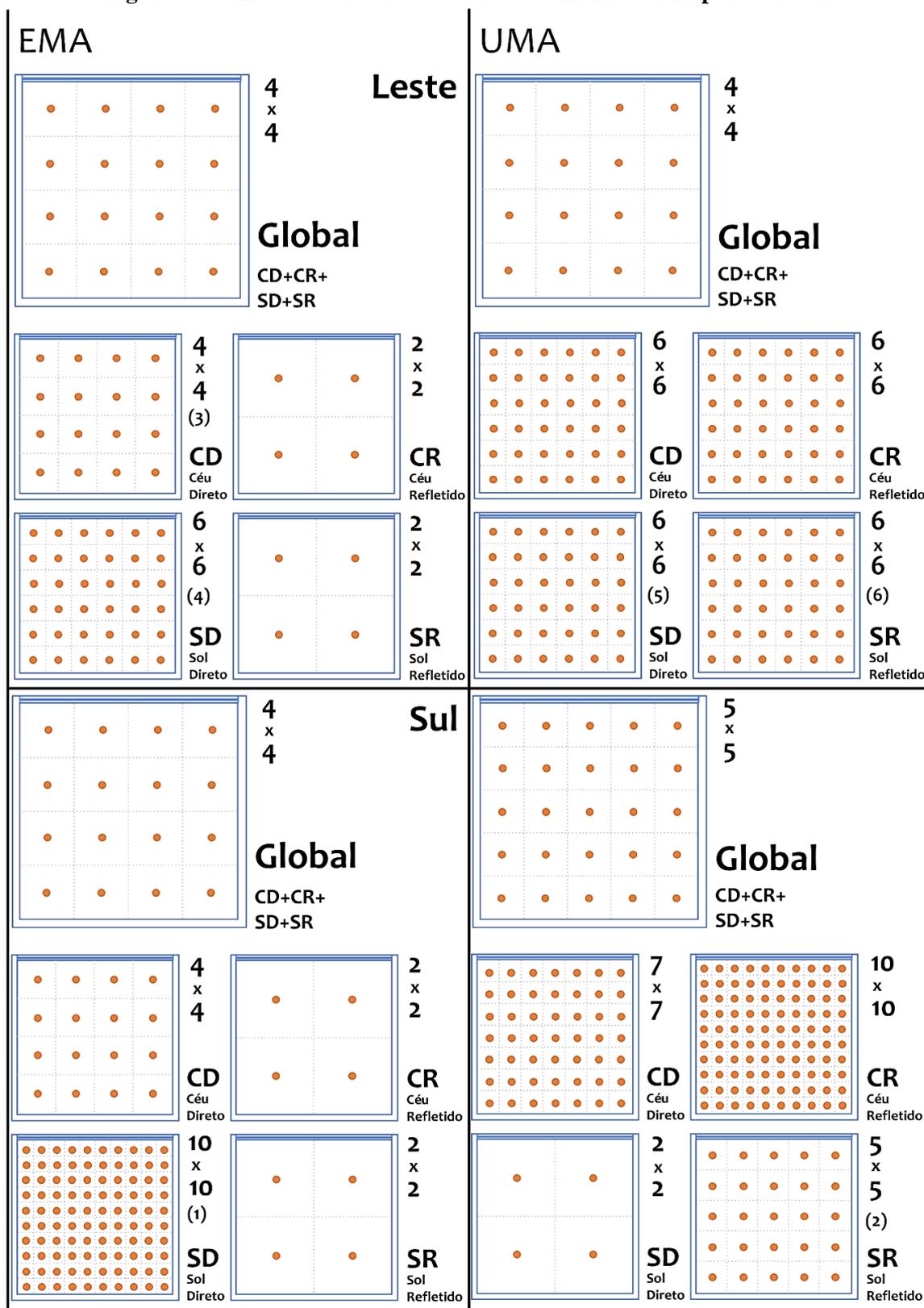
4.5 Conclusão

As duas fases iniciais do trabalho permitiram verificar que há influência nos resultados das métricas de avaliação do desempenho da luz natural quando há variação na malha de pontos. Essa influência pôde ser observada em todo o plano de trabalho, mas com implicações diferentes a depender da região de estudo. Uma síntese dos resultados da primeira fase para iluminância e uniformidade é apresentada de forma gráfica na Figura 39, cujos dados numéricos constam na Tabela 15 do APÊNDICE 4. Os resultados para as métricas de desempenho da luz natural são apresentados, também de forma gráfica, na Figura 40 e os dados numéricos na Tabela 16 do APÊNDICE 4.

É importante destacar que a definição de valores referenciais de malha na primeira e na segunda fase do estudo ainda incorre em algumas questões relativas ao não tratamento dos valores espúrios e as diferenças encontradas entre a análise exploratória e estatística. Os resultados apresentados não são parâmetros de referência das malhas, que serão obtidos nas etapas posteriores, mas valores obtidos a partir do cruzamento dos resultados das duas etapas de análise para ambas as fases. Tais resultados também não são exatamente iguais aos obtidos nos testes de Tukey, tendo em vista que em alguns casos o ajuste foi feito a partir do obtido na análise exploratória.

Observa-se grande variabilidade nos resultados, entretanto, é possível admitir que para o cálculo da EMA, uma malha de 4x4 pontos é suficiente para obter resultados aceitáveis com margem de tolerância de 5%. Já para atender aos critérios de UMA é necessária uma malha de 6x6 pontos. Importante observar que, mesmo com essas definições, a presença de variações, principalmente nas componentes refletida do céu e na luz do sol, faz com que a respectiva análise necessite de avaliação específica, a fim de validar os resultados obtidos. Para os demais índices propostos, as malhas previstas para iluminância e uniformidade atendem bem à quantidade necessária de pontos. Apenas os índices de ALNe e ESA precisam ser avaliados com malha maior, de até 11x11 pontos nesse último.

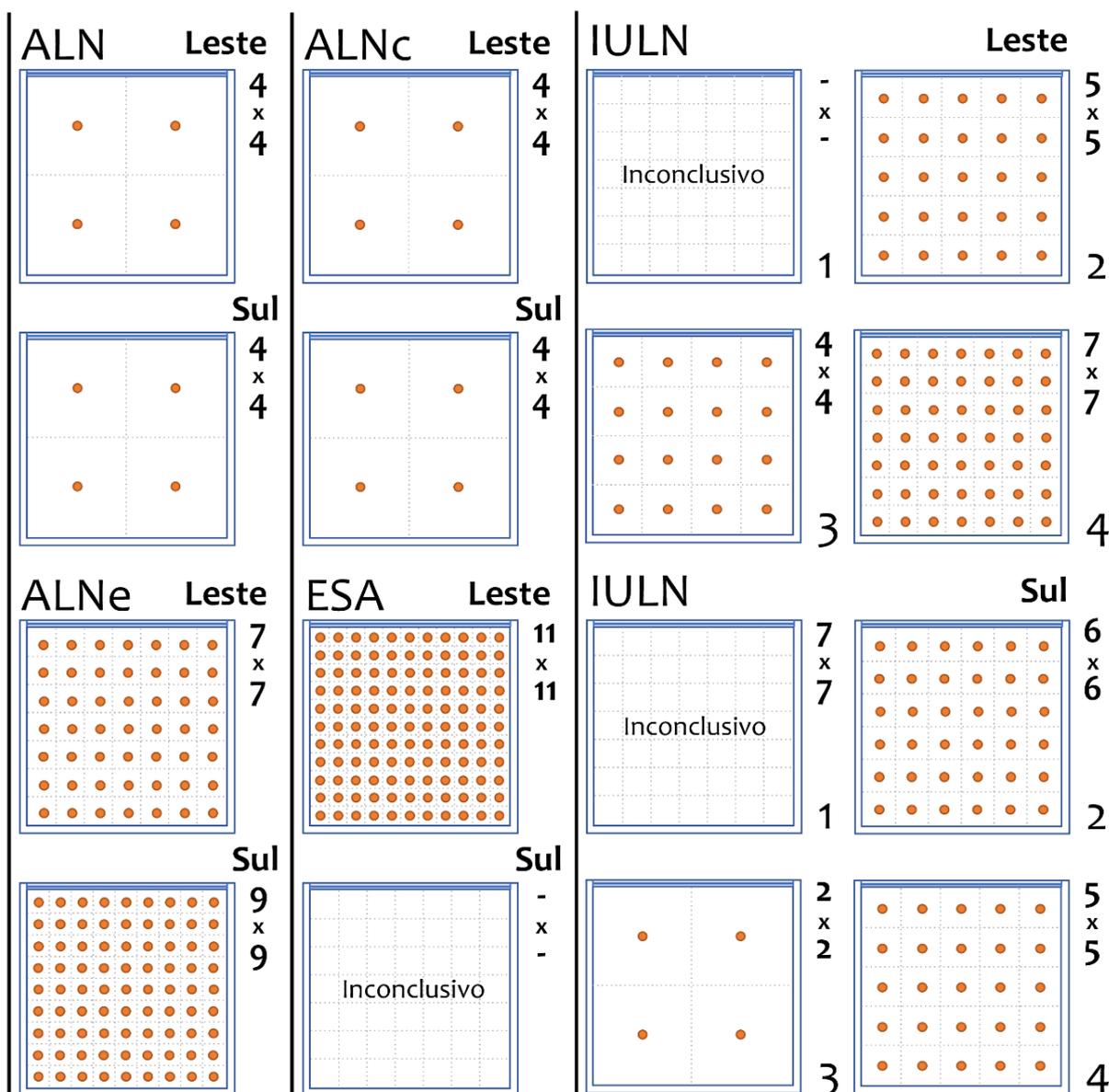
Figura 39 - Síntese dos resultados obtidos de EMA e UMA para a fase 1



Fonte: Elaborada pelo autor

- (1) Picos em 11x1, 13x13 e 14x14; (2) Médias não constantes de Tukey até 13x13; (3) Valores intermediários pelo teste de Tukey a partir de 8x8 ; (4) Valores intermediários pelo teste de Tukey a partir de 7x7; (5) Teste de Tukey não conclusivo; (6) Muito variável pelo teste de Tukey, necessitando de mais avaliações

Figura 40 - Síntese dos resultados obtidos das métricas ALN, ALNc, ALNe, ESA e IULN para a fase 1



Fonte: Elaborada pelo autor

A síntese dos resultados da segunda fase, em que foi verificada a influência da malha dentro de cada setor já foi apresentada de forma gráfica na Figura 37 e na Figura 38 para as orientações leste e sul respectivamente, portanto aqui serão apresentadas na forma de tabela (Tabela 4), com algumas observações que não constam na forma gráfica.

Observa-se que a distinção entre o comportamento das componentes é mais evidente e tem relação direta na forma como a iluminância global varia ao longo do ambiente. No estudo anterior a malha necessária para estabilização dos resultados identificada para a componente global foi de 4x4 pontos no plano de trabalho total, entretanto, esse valor se aplica, em ambas as orientações, no máximo para os três setores mais distantes da janela. Se analisados aqueles

mais próximos seria necessária uma malha maior que 9x9 pontos para obtenção de valores estáveis. Isso indica que a análise do plano completo pode gerar falhas por se tratar de uma média de setores que tem comportamentos distintos entre si.

Tabela 4 - Síntese dos resultados obtidos para variação na densidade de pontos por setor para as orientações sul e leste. Os resultados apresentados são relativos ao teste de Tukey

Setor	Sul					Leste				
	GL	CD	CR	SD	SR	GL	CD	CR	SD	SR
1-A	5x5 ⁽¹⁾	6x6	2x2	6x6	2x2 ⁽⁶⁾	6x6	5x5	2x2 ⁽¹⁾	6x6	1x1 ⁽⁷⁾
1-B	3x3 ⁽¹⁾	5x5	3x3	6x6	1x1 ⁽⁷⁾	6x6	5x5	4x4 ⁽¹⁾	6x6	1x1 ⁽⁷⁾
1-C	6x6 ⁽¹⁾	6x6	2x2	6x6	1x1 ⁽⁷⁾	6x6	5x5	2x2 ⁽¹⁾	6x6	1x1 ⁽⁷⁾
2-A	4x4	3x3	2x2	6x6	1x1 ⁽⁷⁾	3x3 ⁽⁴⁾	3x3	2x2 ⁽¹⁾	5x5	1x1 ⁽⁷⁾
2-B	5x5	3x3	1x1 ⁽⁷⁾	1x1 ⁽⁷⁾	1x1 ⁽⁷⁾	3x3	3x3	1x1 ⁽⁷⁾	6x6	5x5 ⁽¹⁾
2-C	1x1 ⁽⁷⁾	3x3 ⁽³⁾	1x1 ⁽⁷⁾	1x1 ⁽⁷⁾	1x1 ⁽⁷⁾	3x3	3x3	1x1 ⁽⁷⁾	6x6	1x1 ⁽⁷⁾
3-A	1x1 ⁽⁷⁾	3x3 ⁽³⁾	2x2 ⁽⁵⁾	1x1 ⁽⁷⁾	3x3 ⁽⁶⁾	1x1 ⁽⁷⁾	4x4 ⁽¹⁾	4x4 ⁽¹⁾	5x5 ⁽¹⁾	1x1 ⁽⁷⁾
3-B	2x2	3x3 ⁽⁴⁾	2x2	1x1 ⁽⁷⁾	1x1 ⁽⁷⁾	1x1 ⁽⁷⁾	4x4 ⁽¹⁾	2x2 ⁽¹⁾	1x1 ⁽⁷⁾	5x5 ⁽¹⁾
3-C	6x6 ⁽²⁾	3x3 ⁽³⁾	2x2 ⁽⁴⁾	1x1 ⁽⁷⁾	1x1 ⁽⁷⁾	1x1 ⁽⁷⁾	4x4 ⁽¹⁾	6x6 ⁽¹⁾	1x1 ⁽⁷⁾	1x1 ⁽⁷⁾

Fonte: Elaborada pelo autor

(1) Médias muito semelhantes; (2) Distinto apenas nessa posição, mas semelhante nos anteriores, necessitando maiores avaliações; (3) Comportamento distinto em 6x6, mas já estabiliza em 3x3; (4) Comportamento distinto em 5x5, mas estabiliza antes, em 3x3; (5) Comportamento distinto em 5x5, mas estabiliza antes, em 2x2; (6) Inconclusivo, pouca diferença entre médias; (7) Médias estatisticamente iguais

As componentes direta e refletida podem ser agrupadas em dois conjuntos de comportamentos distintos. Observa-se na componente direta que a quantidade de pontos está diretamente relacionada com a penetração da luz solar dentro do ambiente. O ambiente orientado a sul apresenta apenas os setores mais próximos à janela com incidência direta, o que resulta em uma malha setorial de 6x6 pontos, refletindo, se ampliada para o plano de trabalho total, uma malha total de 18x18 pontos, bem maior que a de 10x10 prevista na fase anterior. Para a orientação leste acontece o mesmo efeito, entretanto, a fase anterior prevê apenas 6x6 pontos enquanto que a segunda pede 18x18 se ampliada para o plano total. Esse comportamento reforça a necessidade de tratar a malha de forma setorializada para as componentes de luz direta.

A componente refletida principalmente de céu, resultou em malhas totais pequenas, de 2x2 pontos, na primeira fase do estudo, entretanto, as malhas na segunda fase chegam a setoriais de 4x4 pontos, que se ampliadas de forma uniforme para todo o plano de trabalho chegam a 12x12 pontos. O comportamento da componente refletida relaciona-se principalmente com a

distância do setor à janela, em que quanto mais distante o setor menor a malha de processamento necessária.

5 Malhas não-uniformes e sua influência nas componentes da luz natural

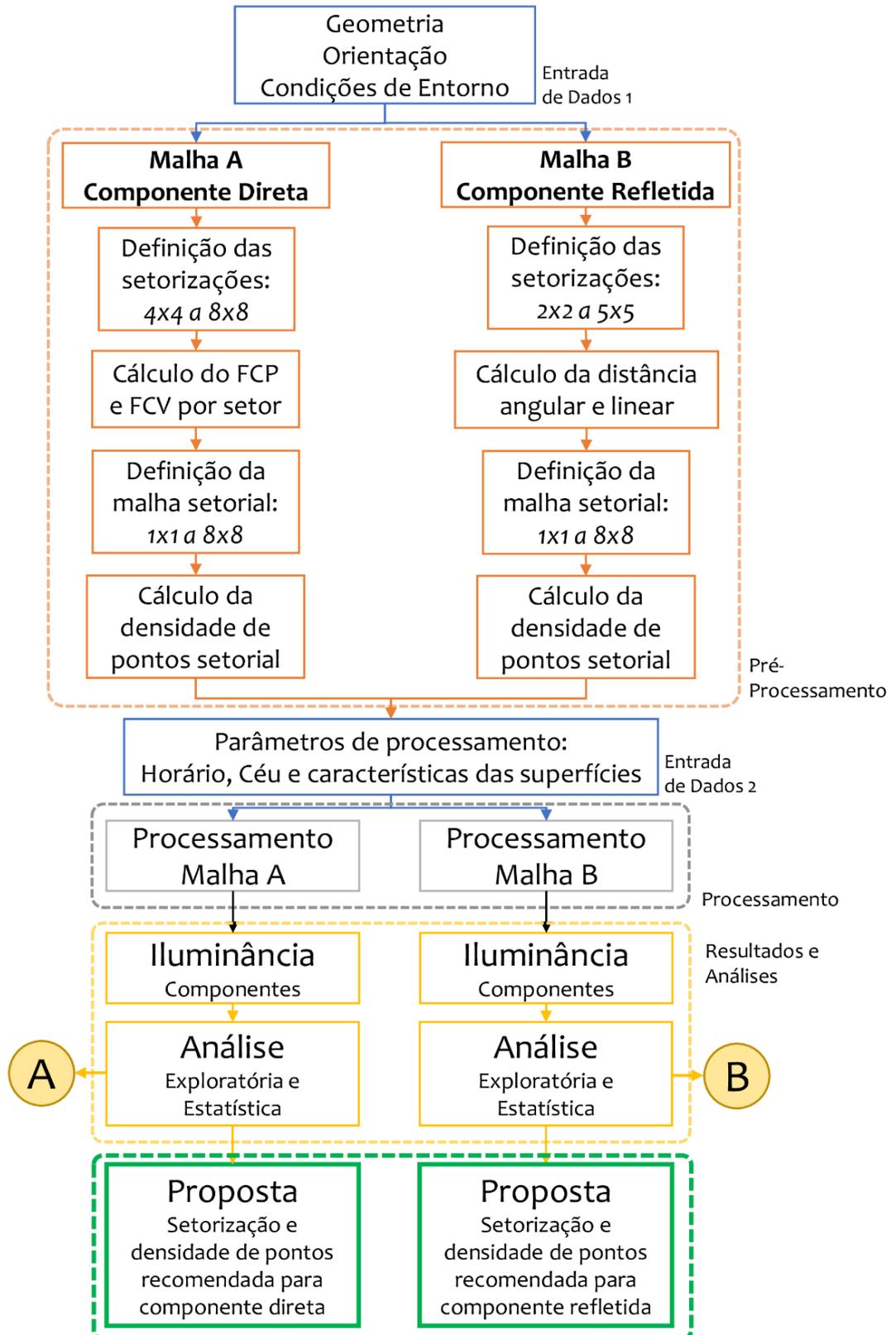
Tendo em vista que os dados as fases anteriores do estudo apontam a diferença de comportamento da iluminância em diferentes regiões do plano de trabalho e que isso impacta diretamente na quantidade necessária de pontos para estabilização dos seus resultados foi desenvolvida a proposta de malhas com densidades não uniformes de pontos. Ambas as fases anteriores apresentaram que o comportamento das métricas de avaliação do desempenho da luz natural acompanham o das componentes da iluminância, sendo necessário apenas o estudo e correta definição dessa segunda.

5.1 Metodologia

Tomando como base os resultados obtidos no nas fases um e dois foi proposta uma metodologia para a determinação da malha de pontos que melhor se associa com as métricas de avaliação da luz natural. Um fluxograma das etapas metodológicas é mostrado na Figura 41. Importante destacar que, como observado anteriormente, as malhas de componente direta e refletida possuem comportamento distintos, fazendo com que a proposta de malhas não uniformes se concentre nessa característica. Algumas etapas apresentadas no fluxograma parecem ser equivalentes para as componentes direta e refletida, entretanto, utilizam critérios e metodologias diferentes, que serão explicitadas nos próximos itens.

As saídas A e B apresentadas no fluxograma dizem respeito a outros fluxogramas relativos às etapas de análise utilizadas no estudo. Cada etapa do fluxograma será detalhada para melhor compreensão do processo utilizado no estudo. Vale ressaltar que a metodologia apresentada, principalmente aquela utilizada na análise e definição da proposta, pode ser utilizada em estudos futuros, para verificação de outros parâmetros de processamento que não os utilizados.

Figura 41 - Fluxograma de etapas de processamento em que se baseiam as etapas metodológicas propostas

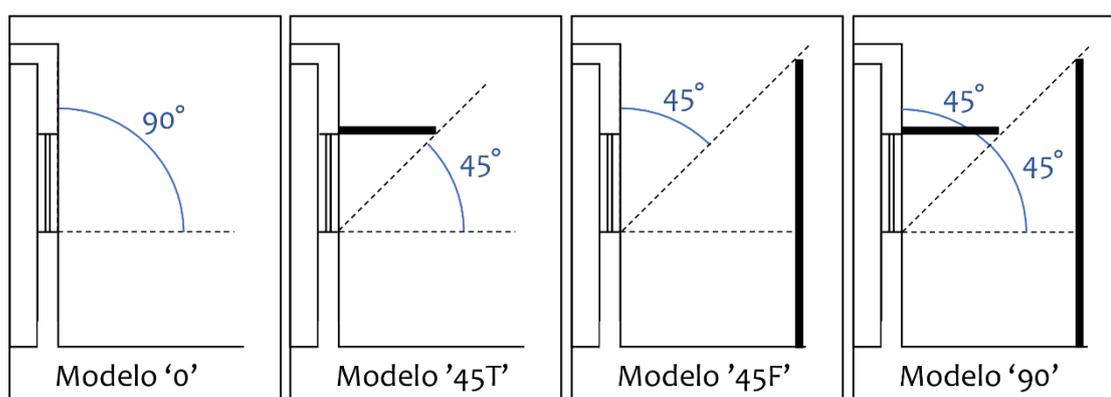


Fonte: Elaborada pelo autor

5.1.1 Geometria, orientação e entorno

Para o estudo da definição das malhas não uniformes foi mantido o modelo de ambiente e as duas orientações utilizadas nas fases anteriores. Uma de suas limitações era a inexistência de obstruções de entorno e sua interferência na definição da malha, entretanto, para a metodologia proposta nesta fase foram avaliadas quatro situações de visão de céu apresentadas na Figura 42.

Figura 42 - Quatro situações de visão de céu propostas para o estudo final.



Fonte: Elaborada pelo autor

Foram estudadas quatro situações de visão de céu: a primeira referente à situação de céu sem obstrução, denominada de '0', a segunda e terceira possuem ângulo de obstrução de abóbada celeste de 45°, sendo a primeira uma obstrução de topo (marquise de 1,0m), denominada de '45T', e a segunda com uma obstrução frontal (muro de 3,1m de altura), denominada de '45F'; por último a situação de céu totalmente obstruído, denominada de '90' (com a marquise do modelo '45T' e muro do modelo '45F'. As obstruções de céu terão consequências no cálculo dos parâmetros de FVC e FCP e para o estudo da componente direta apenas os modelos com visão de céu (0, 45T e 45F) foram estudados.

5.1.2 Malha A - Componentes diretas

O primeiro conjunto de pontos analisados foram aqueles relativos à componente direta e tem como referência os valores do fator de céu ponderado (FCP) e do fator de visão de céu (FVC). O estudo anterior verificou a influência da visão de céu nos resultados da componente direta, entretanto, as análises não permitiram a definição de uma relação matemática entre tais fatores e a densidade de pontos. A definição da setorização para essa malha leva em consideração três situações encontradas no estudo anterior: ao passo que o setor se afasta da janela a componente direta diminui, chegando a zero quando não há visão de céu; a orientação da abertura modifica a quantidade de setores que computam incidência de luz direta e, por

último, que setores paralelos à janela, mesmo que adjacentes, possuem fatores de visão de céu diferentes e, conseqüentemente, densidades diferentes.

A definição da malha inicia-se pela definição dos setores. Na primeira fase do estudo as malhas que obtiveram melhores resultados de iluminância nessa componente, bem como nas métricas estudadas, variaram entre 4x4 (0,44 pt/m²) e 11x11 (3,36 pt/m²) para o plano de trabalho completo. Na fase 2, em que o plano foi dividido em nove setores, a malha dentro dos setores variou entre 3x3 (2,25 pt/m²) e 6x6 (9,00 pt/m²), notando que para a componente de sol as maiores malhas ainda não conseguiram se estabilizar, fazendo com que a metodologia futura verifique malhas com mais pontos do que o já analisado. Para o presente estudo foram propostas para análise cinco combinações de setorizações, começando com a divisão do plano de trabalho em uma malha de 4x4 até uma malha de 8x8 setores, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Malha de setores proposta para a componente direta.

Setorização	Total de Setores	Área por setor (m²)
4x4	16	2,25
5x5	25	1,44
6x6	36	1,00
7x7	49	0,74
8x8	64	0,56

Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores de máximo e mínimo de setorização adotados são justificados pelos resultados das etapas anteriores. A setorização inicial justifica-se por ser maior que a adotada no estudo anterior, de 3x3 setores, que não conseguiu promover estabilidade nos resultados da componente direta mesmo para altas densidades de pontos, e em algumas situações a malha da linha intermediária (2-A, 2-B e 2-C, na fase 2 do estudo) ter, em alguns instantes, incidência solar praticamente desconsiderada quando analisada a média do setor. A malha final justifica-se por ser maior que as até então utilizadas e que, como citado anteriormente, ainda assim não obtiveram médias estatisticamente iguais quando da variação da quantidade de pontos nos estudos estatísticos da fase de estudos preliminares.

Para a definição da densidade de pontos por setor foram utilizadas duas grandezas, a fim de verificar a que melhor se relaciona com os dados obtidos. O fator de céu ponderado (FCP) e o fator de visão de céu (FVC), já utilizados na fase 2, sendo definido o valor médio por setor. O cálculo deste fator utiliza apenas a geometria do ambiente e as obstruções de seu entorno. Nos pontos em que o FCP ou o FVC for zero não se faz necessário mais de um ponto por setor

para o processamento da componente direta. Esse processo requer que o software de simulação em iluminação natural calcule os fatores antes do processamento final, por isso que todo o conjunto de definições foi denominado de ‘pré-processamento’. É importante destacar que inicialmente foi adotado o valor de FCP/FVC médio do setor, entretanto, as análises apontaram que a variação de tais parâmetros dentro do setor seria mais efetiva na definição da malha setorial. Essa conclusão foi obtida ao longo da análise dos resultados e incorporada posteriormente à descrição da metodologia.

Como abordado anteriormente, o estudo anterior apontou densidades entre 2,25 pt/m² e 9,00 pt/m² nos setores, sendo esta última ainda insuficiente para o caso da componente solar. Para o estudo foram propostas oito densidades de pontos diferentes, mostradas na Tabela 6. Foram estudadas malhas setoriais a partir de 1x1 pontos, como observado nas fases anteriores, até malhas de 8x8 pontos por setor, para verificar o comportamento da componente de sol direto, cuja malha de 6x6 no estudo anterior ainda não foi suficiente segundo a análise estatística.

Tabela 6 - Malha de pontos dentro dos setores proposta para a componente direta

Malha setorial	Quantidade de Setores	Densidades total de pontos no plano de trabalho para as malhas setoriais propostas (pt/m ²)				
		Setorização				
		4x4	5x5	6x6	7x7	8x8
1x1	1	0,44	0,69	1,00	1,36	1,77
2x2	4	1,78	2,78	4,00	5,44	7,11
3x3	9	4,00	6,25	9,00	12,25	16,00
4x4	18	8,00	12,50	18,00	24,50	32,00
5x5	25	11,11	17,36	25,00	34,03	44,44
6x6	36	16,00	25,00	36,00	49,00	64,00
7x7	49	21,77	34,03	49,00	66,69	87,11
8x8	64	28,44	44,44	64,00	87,11	113,77

Fonte: Elaborada pelo autor

Com esses parâmetros definidos é possível calcular as coordenadas de cada ponto e seguir para a fase de processamento da componente.

5.1.3 Malha B - Componentes refletidas

Para a definição da malha de pontos da componente refletida foi adotado outro referencial. O estudo anterior apontou que a distância da janela é um fator importante e que ao

passo que ela aumenta a necessidade de pontos de análise diminui. Outra consideração já observada é que há pouca variação entre os setores mais ao fundo e mais próximos da janela, mas que será considerada nas definições posteriores. Na primeira fase do estudo todas as componentes refletidas obtiveram, para a iluminância, malhas recomendadas de 4x4 pontos no plano de trabalho total. Já para as métricas a análise apontou malhas com mais pontos, chegando a malhas de 6x6 para a uniformidade e 9x9 para a ALNe. Na segunda etapa as malhas setoriais variam entre 2x2 e 5x5, apresentando um grande intervalo de densidades.

Para a definição da malha de cálculo da componente refletida foi utilizada uma metodologia semelhante a utilizada na malha A, entretanto, a quantidade de pontos por setor foi menor. As variações de setorização utilizadas nesse estudo foram as mesmas da componente direta, já apresentada na Tabela 5. Para a malha setorial foram estudadas cinco variações, entre 1x1 e 5x5, como apresentadas na Tabela 7. O intervalo adotado está dentro daquele encontrado na segunda fase do estudo e citado anteriormente.

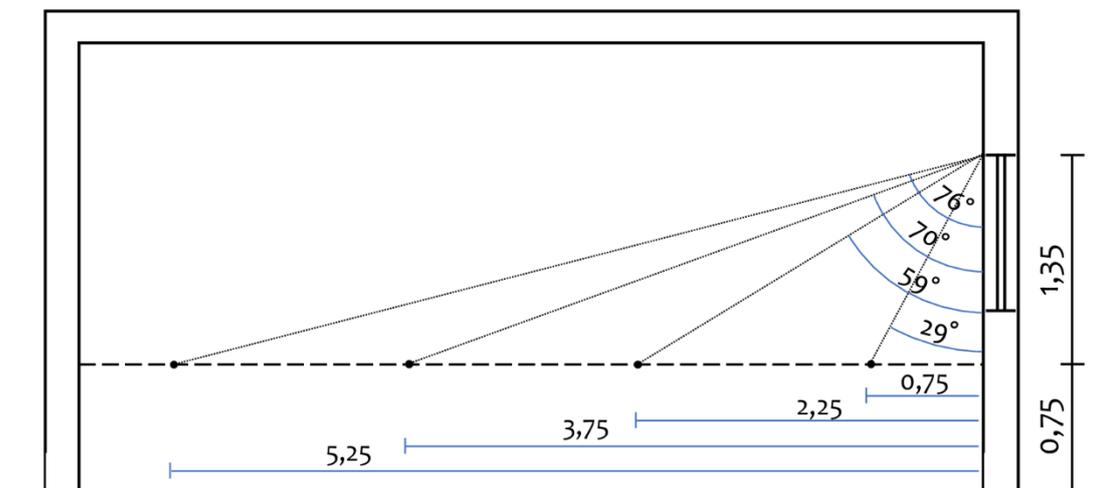
Tabela 7 - Malha de pontos dentro dos setores proposta para a componente refletida

Malha Setorial	Quantidade de Pontos no Setor	Densidades total de pontos no plano de trabalho para as malhas setoriais propostas (pt/m ²)				
		Setorização				
		4x4	5x5	6x6	7x7	8x8
1x1	1	0,44	0,69	1,00	1,36	1,77
2x2	4	1,77	2,77	4,00	5,44	7,11
3x3	9	4,00	6,25	9,00	12,25	16,00
4x4	16	7,11	11,11	16,00	21,77	28,44
5x5	25	11,11	17,36	25,00	34,02	64,00

Fonte: Elaborada pelo autor

A distância até a abertura é parâmetro importante na definição da densidade de pontos por setor e os estudos preliminares apontaram que indícios de que relação existe. Foram adotados dois referenciais para verificar qual deles possui maior influência. O primeiro é a distância do centro do setor até o plano que compõe a abertura, chamado de distância linear (D_L), e o segundo é o ângulo entre a reta que liga o topo da janela ao centro do setor e o plano vertical, chamado, no trabalho, de distância angular (D_A). Um exemplo das duas unidades é apresentado na Figura 43.

Figura 43 - Esquema da distância linear (D_L) e angular (D_A) para uma malha de 4x4 setores



Fonte: Elaborada pelo autor

5.1.4 Parâmetros de processamento

Os parâmetros de processamento utilizados para a fase final do trabalho foram aqueles utilizados anteriormente nas fases um e dois. As refletâncias das superfícies, a transmitância do vidro da janela e o intervalo temporal foram mantidos. Os processamentos ocorreram das 8h às 18h (hora legal), no meio do intervalo, todos os dias do ano, totalizando 3.650 horas. Foi utilizado o Céu com Distribuição Dinâmica de Luminâncias (CDDL) para cada uma das cidades selecionadas.

Para que fosse avaliada a influência da latitude na definição da malha de pontos foram processadas quatro capitais brasileiras: Macapá-AP ($0^{\circ}13' N$), Maceió-AL ($9^{\circ}33' S$), Vitória-ES ($20^{\circ}18' S$) e Porto Alegre ($30^{\circ}04' S$). A escolha das cidades teve como base o estudo de Vasconcellos (2019) e adotou os mesmos critérios da autora: Inicialmente foi definida a capital mais próxima do equador e outras três afastando-se da primeira, aproximadamente, de 10° em 10° para o sul. A Figura 44 apresenta um mapa com as localidades selecionadas e as cartas solares para cada uma.

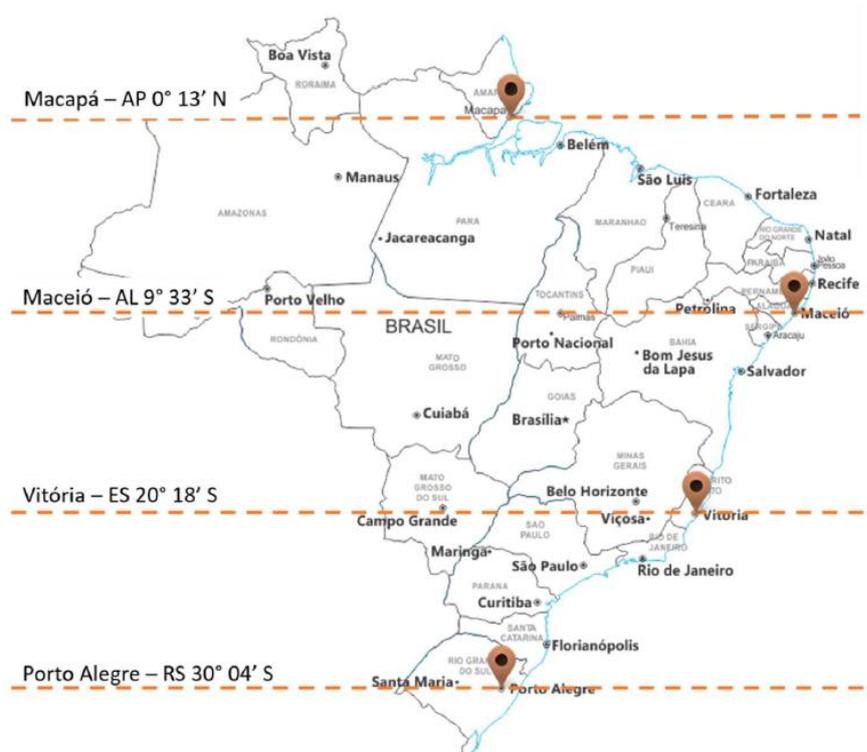
Macapá é a cidade mais ao norte escolhida. Capital do estado do Amapá, se localiza a latitude $0^{\circ} 18' N$ e longitude $51^{\circ}04'O$. Possui temperatura média anual de $27,1^{\circ}C$ e umidade relativa média anual de 82,2%. O céu é predominantemente encoberto (58,7%) seguido do céu parcialmente nublado (25,0%) e do claro (16,3%) (SILVA, QUEIROZ, PEREIRA, 2019).

A segunda cidade seguindo na direção sul é Maceió, que já foi descrita na metodologia da primeira fase do trabalho. Vitória é a capital do estado do Espírito Santo e se localiza na

latitude $20^{\circ} 18' N$ e longitude $40^{\circ}20'O$. Possui temperatura média anual de $24,8^{\circ}C$ e umidade relativa média anual de $77,0\%$. O céu é predominantemente parcialmente encoberto na maior parte do ano, com ocorrência de céu claro predominante em fevereiro (MICHEL, LARANJA, 2020).

Porto Alegre é a cidade mais ao sul dentro do conjunto escolhido, sendo capital do estado do Rio Grande do Sul. A cidade se localiza a latitude $30^{\circ} 04' N$ e longitude $51^{\circ}13'O$. Possui temperatura média anual de $19,6^{\circ}C$ e umidade relativa média anual de $76,5\%$. Seu céu é predominantemente parcialmente encoberto em todo o ano. (MICHEL, LARANJA, 2020).

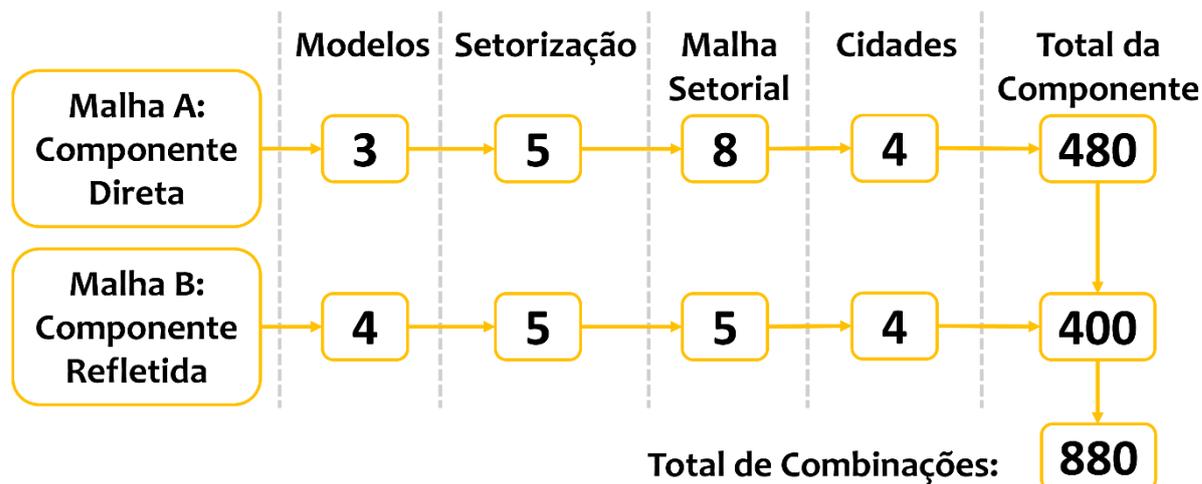
Figura 44 - Mapa com a posição das cidades selecionadas: (a) Macapá, (b) Maceió, (c) Vitória e (d) Porto Alegre



Fonte: VASCONCELLOS, 2019

O processamento da etapa final utilizou o TropLux, em sua versão 8. Importante notar que a metodologia proposta prevê o processamento das componentes direta e refletida de forma independente, bem como o cálculo da iluminância para cada uma delas, possível no programa utilizado. O total de combinações de processamento é apresentada na Figura 45.

Figura 45 - Combinações de variáveis estudadas



Fonte: Elaborada pelo autor

Para cada combinação de modelos serão variadas ainda as orientações, os dias e horas, entretanto, o TropLux permite que tais variações sejam feitas em um único lote de processamentos. Para cada combinação dos parâmetros apresentados há uma quantidade de pontos de análise diferente, resultando em milhões combinações de processamento distintas.

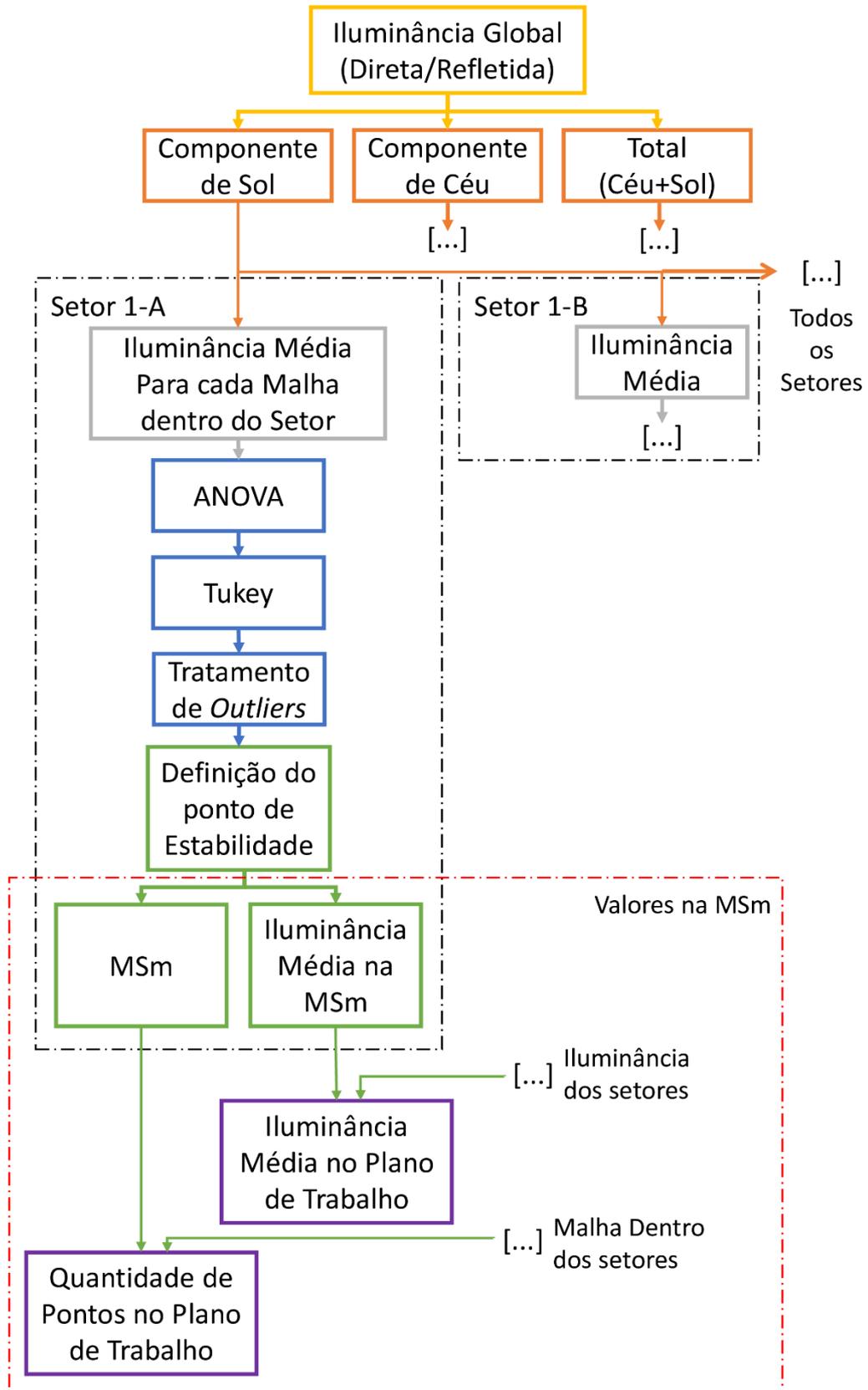
5.1.5 Análise dos resultados

A etapa de análise dos resultados é dividida em três fases. A primeira consiste na definição da malha de pontos dentro dos setores necessária para estabilização dos resultados de iluminância a partir do teste de Tukey, essa será denominada de ‘malha setorial mínima’ (MSmin) e será utilizada em todas as demais etapas de análise; a segunda na definição da setorização recomendada e a terceira na definição da densidade de pontos por setor recomendada. A divisão se justifica pelo fato do grande volume de dados obtidos nas simulações. As análises dos dados de iluminância para cada modelo e situação seria muito grande e pouco objetiva. As etapas utilizadas permitem que o conjunto de dados possa inclusive ser ampliado, com novas variáveis, mantendo-se as mesmas análises e permitindo novas inferências.

5.1.5.1 Definição da malha setorial mínima (MSmin)

As etapas de análise que compreendem o cálculo da MSmin estão descritas no fluxograma da Figura 46. Essa etapa inicial de tratamento dos dados tem como finalidade a definição da MSmin para utilização nas duas etapas que a seguem, de análise da componente direta e da componente refletida.

Figura 46 - Fluxograma das etapas de processamento dos dados para definição da Malha Setorial Mínima



Fonte: Elaborada pelo autor

Denomina-se ‘malha setorial mínima’ (MSmin) a malha de pontos dentro do setor necessária para que os valores de iluminância permaneçam estáveis estatisticamente frente ao aumento na quantidade de pontos, significando que malhas com mais pontos que aquela ‘mínima’ não implicam em valores estatisticamente diferentes de iluminância média no setor. A partir desse valor é possível calcular, somando os de cada setor, a quantidade de pontos total em tais condições, denominada de quantidade de pontos mínima no plano de trabalho, e a partir disso calcular a iluminância no plano de trabalho utilizando a MSmin.

A metodologia apresentada foi aplicada a cada um dos modelos processados, em cada uma das combinações de setorização e de malha dentro dos setores. Inicialmente foram obtidos os valores de iluminância total em cada ponto de análise, para cada dia e hora processadas. Posteriormente a iluminância foi dividida nas componentes direta e refletida, cujas etapas do fluxograma apresentado foram aplicadas a cada uma de forma distinta. Após essa divisão foi realizada uma segunda, agora separando as componentes de céu e sol, totalizando as componentes previstas para o estudo.

Os dados, até então tidos pontos a ponto, dia a dia e hora a hora, foram agrupados espacialmente nos setores e calculada a iluminância média para cada malha dentro do setor para cada dia e hora. Como resultado dessa etapa obteve-se uma matriz cujas linhas correspondem aos dias e horas de processamento (3650) e as colunas as combinações de malhas dentro do setor (de 1x1 até a malha máxima estudada para cada componente).

Essa matriz foi submetida ao teste de hipóteses da ANOVA, a fim de verificar se há diferença estatística entre os valores de iluminância média para cada combinação de malha dentro do setor. Posteriormente foi realizado o agrupamento das médias utilizando o teste de Tukey, permitindo observar a partir de qual malha dentro do setor observa-se estabilidade dos resultados de iluminância. Os testes de ANOVA e Tukey foram realizados utilizando a função estatística do MatLab®, já os agrupamentos a partir dos resultados do teste de Tukey foram feitos utilizando função disponível no File Exchange do MatLab. Tal função foi validada utilizando o software de estatística Minitab 9 ®.

Seguiu a essa etapa o tratamento de Valores espúrios. Foram observadas duas possibilidades, uma de valores distintos no final da série e outra no meio da série. Foram caracterizados como Valores espúrios aqueles valores em que a iluminância para uma malha imediatamente maior e menor pertencem ao mesmo agrupamento de Tukey, fazendo com que essa situação seja desconsiderada. Tal critério foi utilizado para o tratamento de todos os dados

obtidos nessa etapa. O tratamento de Valores espúrios foi feito utilizando-se o método do Desvio médio absoluto (MAD) por ser mais indicado para tratamento associado ao teste de Tukey, como mostrado na seção 3.3.

Após o tratamento foi possível definir a MSmin dentro de cada setor, bem como calcular sua iluminância média correspondente. Os dados de MSmin foram utilizados para a etapa de análise exploratória, já a quantidade de pontos e a iluminância para a MSmin seguem para a segunda etapa de análise estatística. Por fim, com os dados de todos os setores, foi calculada a quantidade de pontos ideal total no plano de trabalho e a iluminância média ideal no plano de trabalho para cada uma das componentes estudadas.

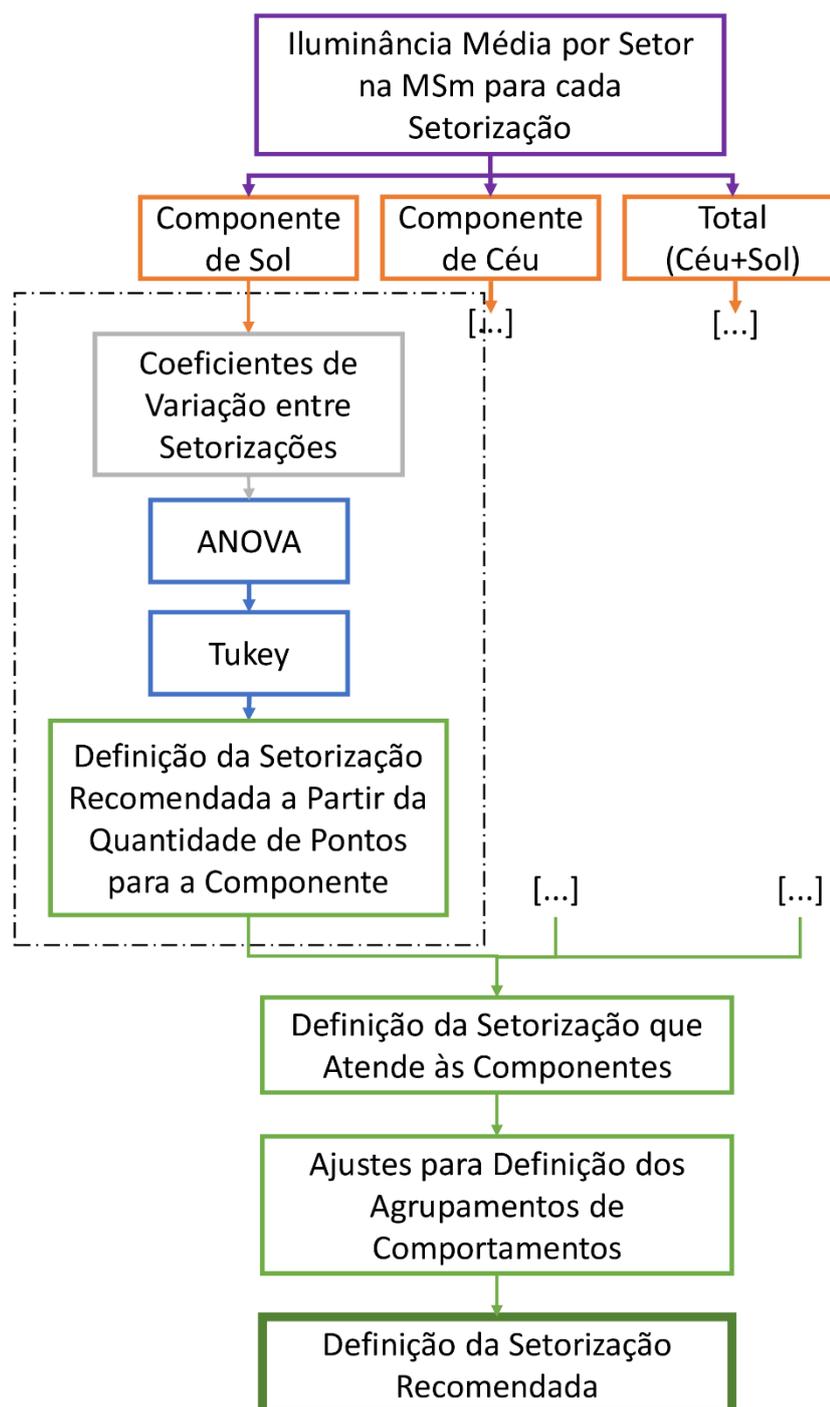
5.1.5.2 Definição da setorização proposta

O estudo da setorização do plano de trabalho iniciou pela análise exploratória dos dados, utilizando os valores de MSmin obtidos na etapa anterior. Para tanto foi verificado seu comportamento frente à variação dos parâmetros de processamento definidos no estudo. Não foi possível apresentar todas as comparações tendo em vista o volume de dados, entretanto, foram escolhidas algumas situações que ilustram o comportamento global observado.

Posteriormente foi analisada, ainda na fase exploratória, a quantidade total de pontos no plano de trabalho para as situações em que todos os setores possuem MSmin a fim de verificar a influência dos parâmetros estudados no total de pontos. A análise foi feita para a malha da componente direta e para a malha da componente refletida. A fase exploratória tem por finalidade guiar o estudo da fase estatística, apontando comportamentos que poderão ou não ser confirmados.

Na sequência foi realizada a análise estatística, cujo fluxograma de etapas é apresentado na Figura 47, em que a sequência de eventos foi realizada para a componente direta e para a refletida separadamente. O processo de definição da setorização recomendada iniciou com os dados de iluminância média por setor, na MSmin, para cada setorização estudada. Foram gerados gráficos da iluminância para cada modelo estudado dentro das variações de setorizações propostas.

Figura 47 - Fluxograma das etapas de processamento dos dados na fase 2, com objetivo de definir a setorização



Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores foram separados nas componentes de céu e sol, cujas etapas seguintes repetem-se para cada componente. Com os valores de iluminância média de cada setorização foi calculado o coeficiente de variação entre setorizações, a fim de verificar a variabilidade EMA em tais casos. Esse estudo permitiu verificar a variabilidade entre setorizações, auxiliando nas etapas seguintes. Para consolidar as inferências foram aplicados os testes de ANOVA e

Tukey, já explicitados anteriormente, que permitiram afirmar se há diferença significativa entre as iluminâncias e os desvios padrão por setorização.

Com tais resultados foi possível definir a setorização ideal. Nos casos em que os testes de ANOVA e Tukey apontam igualdade entre as setorizações o critério de definição da ‘recomendada’ foi aquela com menor quantidade total de pontos no plano de trabalho. Para as situações em que os testes apontam diferença entre as setorizações o critério utilizado para a determinação foi o de menor quantidade de pontos dentro dos agrupamentos de Tukey, e posteriormente dentro das setorizações.

Com os dados de cada componente foi possível definir a setorização que atendesse às três simultaneamente, sendo essa a definida como ‘ideal’. Tendo em vista que as quantidades de pontos entre setorizações, em alguns casos, possuem diferenças pequenas as setorizações ‘recomendadas’ foram ajustadas de forma a identificar agrupamentos de comportamentos frente às variáveis estudadas, permitindo a identificação da setorização ‘ideal’ para cada modelo estudado.

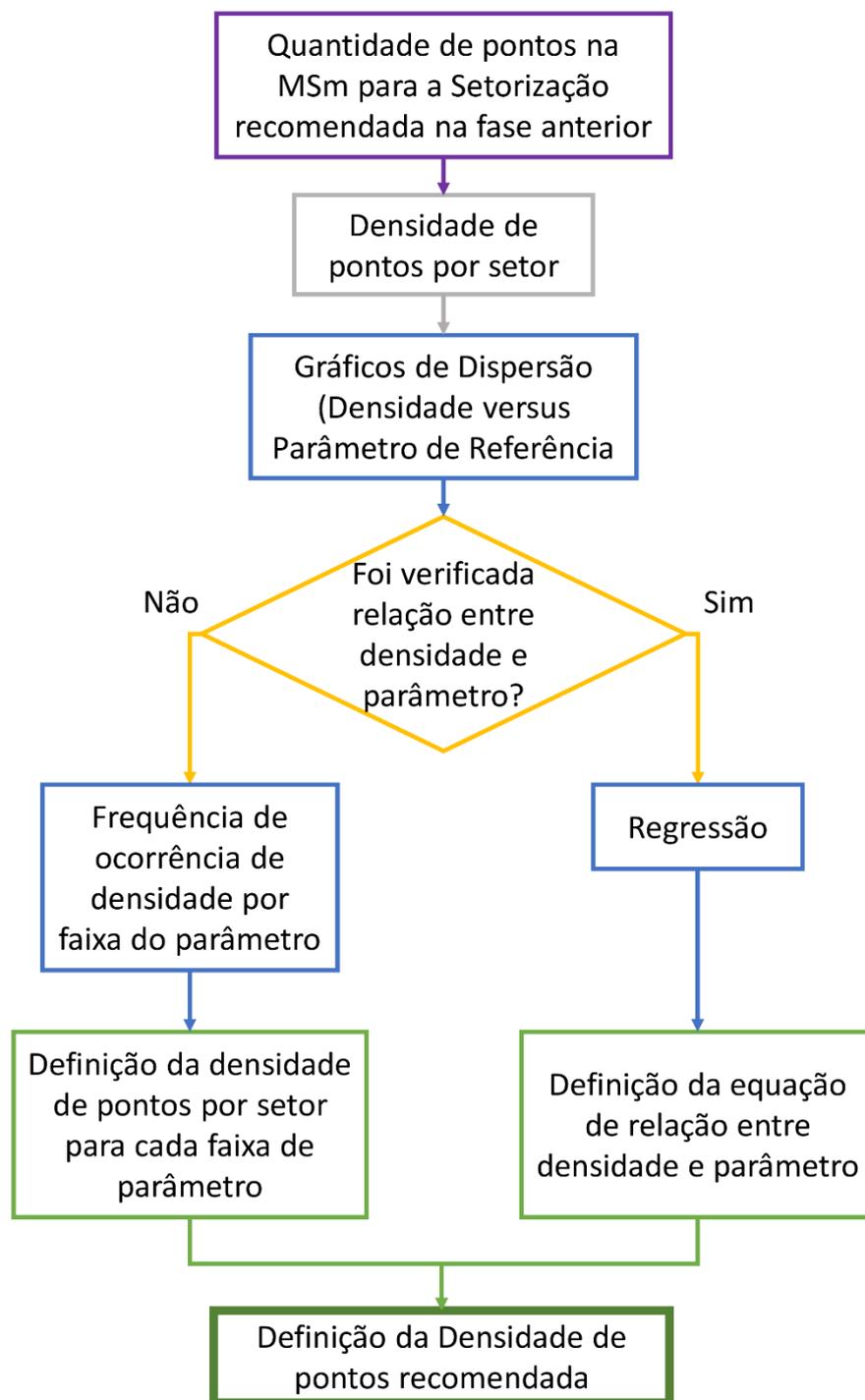
5.1.5.3 Definição da densidade de pontos proposta

Para definição da densidade de pontos, tendo em vista os resultados obtidos, a metodologia teve de ser ajustada para permitir a definição dos parâmetros recomendados a partir dos dados obtidos. Foi utilizado o mesmo dado de entrada que aquele da definição da setorização, a iluminância média por setor na MSmin acompanhada da quantidade de pontos na MSmin, para as componentes direta e refletida. As etapas para definição da densidade de pontos recomendada estão descritas na Figura 48 e foram repetidas para a componente direta e para a componente refletida.

Inicialmente, com os dados de quantidade de pontos por setor para a MSmin na setorização definida como recomendada pela etapa anterior, foi calculada a densidade de pontos por metro quadrado. Posteriormente foram gerados gráficos de dispersão entre a densidade de pontos e os parâmetros de referência adotados. Para a malha da componente direta foram utilizados o FVC e o FCP, já para a malha da componente refletida a distância linear e a distância angular à abertura. Caso fosse observada relação suficiente entre as variáveis para definição de uma regressão, seja linear, polinomial ou logarítmica, esta seria a equação de relação entre as variáveis. No caso de não verificação de tal comportamento o estudo parte para outra estratégia, avaliando a frequência de ocorrência de determinadas malhas em cada faixa de

parâmetro, apontando que aquelas de maior frequência seriam as indicadas para serem recomendadas.

Figura 48 - Fluxograma das etapas de processamento dos dados na fase 2, com objetivo de definir a densidade de pontos por setor



Fonte: Elaborada pelo autor

Importante destacar que a estratégia de regressão foi a inicialmente adotada, entretanto, tendo em vista os resultados obtidos, fez-se necessária a escolha da metodologia alternativa a fim de permitir a definição da densidade de pontos recomendada.

5.2 Resultados

Os resultados serão apresentados em duas etapas, primeiro será realizada a análise exploratória dos resultados de MSmin, divididos entre as malhas direta e refletida. Na sequência seguirá a etapa de análise estatística, dividida essa também em duas etapas, a que trata da setorização e a que trata da quantidade de pontos por setor.

5.2.1 Análise exploratória

Utilizando a metodologia descrita anteriormente foi definida a MSmin para cada setorização e para cada setor, seus valores espúrios foram tratados e os resultados foram apresentados de forma esquemática no APÊNDICE 4. A apresentação de todos os dados, gráficos e diagramas gerados na fase exploratória no corpo do texto faria com que a compreensão dos resultados se tornasse longa e exaustiva, para tanto serão apresentados alguns resultados representativos dos comportamentos observados e suas inferências obtidas nas análises.

5.2.1.1 Malha para cálculo da componente direta

Tendo em vista a proposta do trabalho de divisão da malha de cálculo para a componente direta e refletida, a apresentação dos resultados seguirá tal estrutura. Os modelos analisados foram apenas aqueles sem obstrução (0), os com obstrução frontal (45F) e os com obstrução de topo (45T). Os modelos com obstrução total (90) não serão estudados pois não possuem visão de céu, fazendo com que a iluminância de tal componente seja sempre zero.

Para o estudo da iluminância direta e suas componentes foi escolhido o modelo sem obstrução externa por ser aquele que melhor representa os comportamentos observados, sendo a análise da influência da obstrução externa feita em etapa posterior. São apresentados de forma esquemática na Figura 49 os resultados da MSmin para as duas orientações estudadas e para as cidades de Macapá e Porto Alegre.

As cidades escolhidas justificam-se por estar nas extremidades do intervalo de latitudes processadas, em que Macapá é a de menor latitude ($0^{\circ} 13'N$) e Porto Alegre é a de maior latitude ($30^{\circ}04'S$). São apresentados os dados para a setorização de 4x4 tendo em vista que esta é a que melhor exemplifica os comportamentos observados.

Figura 49 - Resultados da MSmin para a setorização de 4x4 nas cidades de Macapá e Porto Alegre, para o modelo sem obstrução externa.

	CD Céu Direto + SD Sol Direto	CD Céu Direto	SD Sol Direto																																																																																																
Cidade MACAPÁ 0° 13'N	101 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>3x3</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>3x3</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	4x4	4x4	4x4	4x4	2-A	2-B	2-C	2-D	3x3	1x1	1x1	1x1	3-A	3-B	3-C	3-D	2x2	2x2	2x2	3x3	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1	94 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	4x4	4x4	4x4	4x4	2-A	2-B	2-C	2-D	2x2	2x2	2x2	2x2	3-A	3-B	3-C	3-D	1x1	2x2	2x2	1x1	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1	93 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>3x3</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	4x4	4x4	4x4	4x4	2-A	2-B	2-C	2-D	3x3	1x1	1x1	1x1	3-A	3-B	3-C	3-D	2x2	2x2	2x2	1x1	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
4x4	4x4	4x4	4x4																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
3x3	1x1	1x1	1x1																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
2x2	2x2	2x2	3x3																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
4x4	4x4	4x4	4x4																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
2x2	2x2	2x2	2x2																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
1x1	2x2	2x2	1x1																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
4x4	4x4	4x4	4x4																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
3x3	1x1	1x1	1x1																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
2x2	2x2	2x2	1x1																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
Orientação LESTE																																																																																																			
Obstrução 0																																																																																																			
Cidade MACAPÁ 0° 13'N	163 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>6x6</td><td>6x6</td><td>6x6</td><td>3x3</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>3x3</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>3x3</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	6x6	6x6	6x6	3x3	2-A	2-B	2-C	2-D	2x2	2x2	2x2	2x2	3-A	3-B	3-C	3-D	3x3	2x2	2x2	3x3	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1	110 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>3x3</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>3x3</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	4x4	4x4	4x4	4x4	2-A	2-B	2-C	2-D	2x2	2x2	2x2	2x2	3-A	3-B	3-C	3-D	3x3	2x2	2x2	3x3	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1	79 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	4x4	4x4	4x4	4x4	2-A	2-B	2-C	2-D	2x2	1x1	1x1	1x1	3-A	3-B	3-C	3-D	1x1	1x1	1x1	1x1	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
6x6	6x6	6x6	3x3																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
2x2	2x2	2x2	2x2																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
3x3	2x2	2x2	3x3																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
4x4	4x4	4x4	4x4																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
2x2	2x2	2x2	2x2																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
3x3	2x2	2x2	3x3																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
4x4	4x4	4x4	4x4																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
2x2	1x1	1x1	1x1																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
Orientação SUL																																																																																																			
Obstrução 0																																																																																																			
Cidade PORTO A. 30° 04'S	91 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	4x4	4x4	4x4	4x4	2-A	2-B	2-C	2-D	2x2	1x1	1x1	1x1	3-A	3-B	3-C	3-D	2x2	2x2	2x2	2x2	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1	94 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	4x4	4x4	4x4	4x4	2-A	2-B	2-C	2-D	2x2	2x2	2x2	2x2	3-A	3-B	3-C	3-D	1x1	2x2	2x2	1x1	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1	82 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	4x4	4x4	4x4	4x4	2-A	2-B	2-C	2-D	1x1	1x1	1x1	1x1	3-A	3-B	3-C	3-D	2x2	2x2	1x1	1x1	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
4x4	4x4	4x4	4x4																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
2x2	1x1	1x1	1x1																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
2x2	2x2	2x2	2x2																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
4x4	4x4	4x4	4x4																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
2x2	2x2	2x2	2x2																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
1x1	2x2	2x2	1x1																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
4x4	4x4	4x4	4x4																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
2x2	2x2	1x1	1x1																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
Orientação LESTE																																																																																																			
Obstrução 0																																																																																																			
Cidade PORTO A. 30° 04'S	37 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>2x2</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	1x1	1x1	2x2	1x1	2-A	2-B	2-C	2-D	2x2	2x2	2x2	2x2	3-A	3-B	3-C	3-D	1x1	2x2	2x2	1x1	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1	94 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td><td>4x4</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>2x2</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>2x2</td><td>2x2</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	4x4	4x4	4x4	4x4	2-A	2-B	2-C	2-D	2x2	2x2	2x2	2x2	3-A	3-B	3-C	3-D	1x1	2x2	2x2	1x1	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1	75 Pontos <table border="1"> <tr><td>1-A</td><td>1-B</td><td>1-C</td><td>1-D</td></tr> <tr><td>4x4</td><td>3x3</td><td>4x4</td><td>4x4</td></tr> <tr><td>2-A</td><td>2-B</td><td>2-C</td><td>2-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>3-A</td><td>3-B</td><td>3-C</td><td>3-D</td></tr> <tr><td>2x2</td><td>2x2</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> <tr><td>4-A</td><td>4-B</td><td>4-C</td><td>4-D</td></tr> <tr><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td><td>1x1</td></tr> </table>	1-A	1-B	1-C	1-D	4x4	3x3	4x4	4x4	2-A	2-B	2-C	2-D	1x1	1x1	1x1	1x1	3-A	3-B	3-C	3-D	2x2	2x2	1x1	1x1	4-A	4-B	4-C	4-D	1x1	1x1	1x1	1x1
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
1x1	1x1	2x2	1x1																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
2x2	2x2	2x2	2x2																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
1x1	2x2	2x2	1x1																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
4x4	4x4	4x4	4x4																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
2x2	2x2	2x2	2x2																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
1x1	2x2	2x2	1x1																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
1-A	1-B	1-C	1-D																																																																																																
4x4	3x3	4x4	4x4																																																																																																
2-A	2-B	2-C	2-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
3-A	3-B	3-C	3-D																																																																																																
2x2	2x2	1x1	1x1																																																																																																
4-A	4-B	4-C	4-D																																																																																																
1x1	1x1	1x1	1x1																																																																																																
Orientação SUL																																																																																																			
Obstrução 0																																																																																																			

Fonte: Elaborada pelo autor

Inicialmente observa-se que as componentes de céu direto (CD) e sol direto (SD) possuem comportamentos distintos de acordo com a orientações do modelo. Em todas as componentes nota-se a redução na quantidade total de pontos no plano de trabalho com o aumento da latitude, o que pode ser explicado pelo aumento na presença de céus parcialmente

nublados e encobertos para as cidades de maior latitude, fazendo com que os efeitos da insolação direta sejam menores na variação da iluminância dentro dos setores. As duas componentes estudadas estão sujeitas à variação diária e horária das condições de céu, tendo em vista que para o processamento do estudo foi utilizado o céu com distribuição dinâmica de luminâncias (DLL). Tal variação faz com que a distribuição de pontos por setorização, principalmente na componente de sol direto (SD), não seja simétrica em relação à janela.

Para as duas orientações de modelo estudadas verifica-se a necessidade de mais pontos de cálculo da iluminância para a orientação leste que a sul. Esse comportamento pode ser explicado pela maior penetração da luz na primeira metade do dia para a orientação leste, se comparada à outra estudada. É possível verificar ainda a predominância de setores com mais de um ponto junto à janela, o que se mantém em praticamente todos os modelos, obstruções e orientações estudadas, salvo alguns casos de exceção como o da cidade de Porto Alegre com janela orientada a sul, como mostrado na Figura 49. Tal comportamento está diretamente relacionado com a visão de céu para cada modelo, onde os pontos mais próximos à janela possuem maior variação da visão de céu que aqueles mais distantes, entretanto, tal comportamento será avaliado mais a frente.

Nos modelos com obstrução de frente (45F) observa-se a predominância de setores com mais pontos na região próxima à janela, compreendendo o primeiro terço do ambiente, o que não acontece nos demais modelos estudados, onde os setores que necessitam de mais de um ponto se distribuem ao longo de todo o plano de trabalho. Tal comportamento também está relacionado com a visão de céu dos pontos do setor. Nos modelos com obstrução de topo (45T) os setores com mais de um ponto tendem a se localizar mais distantes da abertura, principalmente na componente de céu direto (CD). A compreensão mais detalhada desse fenômeno foi abordada mais a frente, no estudo da distribuição do FVC, que é apresentada na Figura 53.

Quando analisada a componente direta total (CD+SD) os resultados apontam que na maioria dos casos há necessidade de um total de pontos no plano de trabalho maior do que as componentes isoladas, salvo algumas exceções. Ela também apresentou o mesmo comportamento que as demais frente ao aumento da latitude, reduzindo a quantidade total de pontos no plano de trabalho. Essas inferências permitem indicar que a definição da setorização e da quantidade de pontos deve levar em conta as componentes de forma isolada, mas que, no caso da componente total direta, seus resultados permitem atender às demais na maioria das situações.

Para o estudo da setorização são apresentados os resultados da MSmin para a componente direta total na cidade de Vitória, que melhor exemplificam os comportamentos observados, nos três modelos de obstrução processados (0, 45F e 45T). Foram estudadas cinco variações de setorizações do plano de trabalho, entretanto, foram apresentadas apenas três. As setorizações escolhidas justificam-se por estar nas extremidades do intervalo de variações (4x4 e 8x8), e uma no centro (6x6), permitindo a comparação e a verificação do comportamento com sua mudança.

Para o modelo sem obstrução externa os resultados são apresentados na Figura 50 onde é possível observar que a setorização altera o comportamento das malhas dentro dos setores em todos os casos estudados. Em sua maioria é possível observar o aumento da quantidade total de pontos no plano de trabalho associado ao aumento da setorização, esse comportamento acontece em todos os modelos estudados principalmente nos maiores que 7x7. As setorizações de 4x4 e 6x6 variaram na ocorrência de menores quantidades de pontos no plano de trabalho, para as orientações sul e leste respectivamente.

Figura 50 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo sem obstrução externa (0) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8.

		Setorização 4x4				Setorização 6x6						Setorização 8x8							
		96 Pontos				84 Pontos						193 Pontos							
Cidade VITÓRIA 20° 18'S	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H	
	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H	
	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-G	3-H	
	4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D	4-E	4-F	4-A	4-B	4-C	4-D	4-E	4-F	4-G	4-H	
Orientação LESTE	3x3	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	
Obstrução 0	2x2	2x2	2x2	2x2	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	
	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	
	1x1	1x1	2x2	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	
Orientação SUL	2x2	2x2	2x2	2x2	1x1	2x2	1x1	2x2	2x2	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	
Obstrução 0	1x1	2x2	2x2	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	2x2	1x1	1x1	1x1	2x2	1x1	1x1	
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	
	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	7x7	
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	

Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados apresentados mostram ainda que a setorização de 4x4 apresenta setores com mais de um ponto distribuídos em grande parte do plano de trabalho, enquanto que as maiores, de 6x6 e 8x8, se concentram na região próxima à janela, com ocorrências localizadas. Observa-se, nesse sentido, que a densidade de pontos na região próxima à janela aumenta junto com o aumento na setorização. Esse comportamento se dá principalmente pela grande variação da visão de céu nos setores, que será estudada posteriormente.

A orientação da abertura também gerou diferença nos resultados das setorizações. Para o modelo estudado a variação causou impacto na quantidade total de pontos no plano de trabalho, sendo a janela orientada a sul aquela que requer menos pontos para as setorizações estudadas. Nos modelos com abertura orientada a leste o aumento na setorização tende a concentrar os setores com mais de um ponto nas porções próximas à janela, o que também acontece na janela orientada a sul, mas com eventos isolados também naqueles mais distantes. A presença de tais eventos pode indicar duas situações, uma de variações locais da iluminância, o que não acontece, e uma segunda de valores espúrios, indicando que o método utilizado não conseguiu identificar todos os casos.

Vale destacar que o aumento na área de setores com apenas um ponto não implica em redução na quantidade de pontos total no plano de trabalho. Tal situação pode ser observada no modelo orientado a leste comparando as setorizações de 4x4 e 8x8. Na primeira, a área de setores com mais de um ponto é maior que na segunda, entretanto, a quantidade total de pontos é menor. Tal comportamento pode indicar que a utilização de setorizações não regulares é uma possibilidade de melhoria no método até então proposto.

Para o modelo com obstrução de topo (45T) os resultados são apresentados na Figura 51. Nessa situação observam-se quantidades totais de pontos semelhantes ao modelo anterior nas setorizações de 4x4 e 6x6, entretanto, o comportamento dos setores com mais de um ponto apresentaram algumas particularidades. É possível observar que os setores com mais de um ponto localizam-se predominantemente na primeira linha, para todas as setorizações e que a quantidade de pontos dentro dessa região é sempre superior ao restante do plano de trabalho. As duas orientações estudadas apresentaram comportamento semelhante quanto à distribuição dos setores com mais de um ponto, entretanto, as quantidades de pontos são diferentes principalmente na setorização de 8x8.

Figura 51 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo com obstrução de topo (45T) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8.

		Setorização 4x4				Setorização 6x6						Setorização 8x8							
Cidade VITÓRIA 20° 18'S		90 Pontos				84 Pontos						100 Pontos							
	Orientação LESTE	1-A 4X4	1-B 4X4	1-C 4X4	1-D 4X4	1-A 3X3	1-B 3X3	1-C 3X3	1-D 3X3	1-E 3X3	1-F 3X3	1-A 2X2	1-B 2X2	1-C 2X2	1-D 2X2	1-E 2X2	1-F 2X2	1-G 2X2	1-H 4X4
	Obstrução 45T	2-A 1X1	2-B 1X1	2-C 1X1	2-D 1X1	2-A 1X1	2-B 1X1	2-C 1X1	2-D 1X1	2-E 1X1	2-F 1X1	2-A 1X1	2-B 1X1	2-C 1X1	2-D 1X1	2-E 1X1	2-F 1X1	2-G 1X1	2-H 1X1
		3-A 1X1	3-B 1X1	3-C 1X1	3-D 1X1	3-A 1X1	3-B 1X1	3-C 1X1	3-D 1X1	3-E 1X1	3-F 1X1	3-A 1X1	3-B 1X1	3-C 1X1	3-D 1X1	3-E 1X1	3-F 1X1	3-G 1X1	3-H 1X1
Cidade VITÓRIA 20° 18'S		88 Pontos				84 Pontos						235 Pontos							
	Orientação SUL	1-A 4X4	1-B 4X4	1-C 4X4	1-D 4X4	1-A 3X3	1-B 3X3	1-C 3X3	1-D 3X3	1-E 3X3	1-F 3X3	1-A 2X2	1-B 5X5	1-C 5X5	1-D 5X5	1-E 5X5	1-F 5X5	1-G 5X5	1-H 5X5
	Obstrução 45T	2-A 1X1	2-B 1X1	2-C 1X1	2-D 1X1	2-A 1X1	2-B 1X1	2-C 1X1	2-D 1X1	2-E 1X1	2-F 1X1	2-A 1X1	2-B 1X1	2-C 1X1	2-D 1X1	2-E 1X1	2-F 1X1	2-G 1X1	2-H 1X1
		3-A 1X1	3-B 2X2	3-C 2X2	3-D 1X1	3-A 1X1	3-B 1X1	3-C 1X1	3-D 1X1	3-E 1X1	3-F 1X1	3-A 1X1	3-B 1X1	3-C 1X1	3-D 1X1	3-E 1X1	3-F 1X1	3-G 1X1	3-H 1X1
	4-A 1X1	4-B 2X2	4-C 2X2	4-D 1X1	4-A 1X1	4-B 1X1	4-C 1X1	4-D 1X1	4-E 1X1	4-F 1X1	4-A 1X1	4-B 1X1	4-C 1X1	4-D 1X1	4-E 1X1	4-F 1X1	4-G 1X1	4-H 1X1	
	5-A 1X1	5-B 1X1	5-C 1X1	5-D 1X1	5-A 1X1	5-B 1X1	5-C 1X1	5-D 1X1	5-E 1X1	5-F 1X1	5-A 1X1	5-B 1X1	5-C 1X1	5-D 1X1	5-E 1X1	5-F 1X1	5-G 1X1	5-H 1X1	
	6-A 1X1	6-B 1X1	6-C 1X1	6-D 1X1	6-A 1X1	6-B 1X1	6-C 1X1	6-D 1X1	6-E 1X1	6-F 1X1	6-A 1X1	6-B 1X1	6-C 1X1	6-D 1X1	6-E 1X1	6-F 1X1	6-G 1X1	6-H 1X1	
	7-A 1X1	7-B 1X1	7-C 1X1	7-D 1X1	7-A 1X1	7-B 1X1	7-C 1X1	7-D 1X1	7-E 1X1	7-F 1X1	7-A 1X1	7-B 1X1	7-C 1X1	7-D 1X1	7-E 1X1	7-F 1X1	7-G 1X1	7-H 1X1	
	8-A 1X1	8-B 1X1	8-C 1X1	8-D 1X1	8-A 1X1	8-B 1X1	8-C 1X1	8-D 1X1	8-E 1X1	8-F 1X1	8-A 1X1	8-B 1X1	8-C 1X1	8-D 1X1	8-E 1X1	8-F 1X1	8-G 1X1	8-H 1X1	

Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se ainda que no modelo com abertura orientada a sul a setorização de 8x8 indica grande quantidade de pontos dentro dos setores da primeira linha, mais próxima a abertura. Percebe-se, para tal orientação, que ao passo que o setor diminui de tamanho aumenta a quantidade de pontos necessária para a estabilização dos resultados de iluminância média dentro do setor. Esse comportamento será explicado posteriormente na análise da visão de céu por setor, mas já é possível identificar que as regiões mais próximas a abertura possuem maior variação de iluminância, resultando em malhas com mais pontos dentro do setor.

O comportamento dos resultados para os modelos com obstrução de frente (45F) são apresentados na Figura 52. Para essa situação é possível observar que os setores em que são necessários mais de um ponto acontecem sempre na primeira metade do ambiente, independente da setorização. Esse comportamento se repete em todas as variações de orientação e latitude. Ele é justificado pelo comportamento das variáveis de visão de céu abordadas posteriormente.

Figura 52 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo com obstrução de frente (45F) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8

	Setorização 4x4				Setorização 6x6						Setorização 8x8									
	88 Pontos				84 Pontos						235 Pontos									
Cidade	VITÓRIA				VITÓRIA						VITÓRIA									
	20° 18'S				20° 18'S						20° 18'S									
Orientação	LESTE				LESTE						LESTE									
Obstrução	45F				45F						45F									
	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H		
	4x4	4x4	4x4	4x4	3x3	1x1	1x1	1x1	1x1	3x3	4x4	4x4	4x4	4x4	4x4	4x4	4x4	2x2		
	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H		
	4x4	4x4	4x4	4x4	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	2x2	1x1								
	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-G	3-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	4x4	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	3x3		
	4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D	4-E	4-F	4-A	4-B	4-C	4-D	4-E	4-F	4-G	4-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1		
	5-A	5-B	5-C	5-D	5-A	5-B	5-C	5-D	5-E	5-F	5-A	5-B	5-C	5-D	5-E	5-F	5-G	5-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1		
	6-A	6-B	6-C	6-D	6-A	6-B	6-C	6-D	6-E	6-F	6-A	6-B	6-C	6-D	6-E	6-F	6-G	6-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1		
	7-A	7-B	7-C	7-D	7-A	7-B	7-C	7-D	7-E	7-F	7-A	7-B	7-C	7-D	7-E	7-F	7-G	7-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1		
	8-A	8-B	8-C	8-D	8-A	8-B	8-C	8-D	8-E	8-F	8-A	8-B	8-C	8-D	8-E	8-F	8-G	8-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1		
	124 Pontos	432 Pontos						338 Pontos												
Cidade	VITÓRIA				VITÓRIA						VITÓRIA									
	20° 18'S				20° 18'S						20° 18'S									
Orientação	SUL				SUL						SUL									
Obstrução	45F				45F						45F									
	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H		
	5x5	5x5	5x5	5x5	7x7	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5	5x5		
	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H		
	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	1x1	1x1	1x1	2x2	2x2		
	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-G	3-H		
	6x6	6x6	6x6	6x6	6x6	6x6	6x6	6x6	6x6	6x6	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3		
	4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D	4-E	4-F	4-A	4-B	4-C	4-D	4-E	4-F	4-G	4-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1		
	5-A	5-B	5-C	5-D	5-A	5-B	5-C	5-D	5-E	5-F	5-A	5-B	5-C	5-D	5-E	5-F	5-G	5-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1		
	6-A	6-B	6-C	6-D	6-A	6-B	6-C	6-D	6-E	6-F	6-A	6-B	6-C	6-D	6-E	6-F	6-G	6-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1		
	7-A	7-B	7-C	7-D	7-A	7-B	7-C	7-D	7-E	7-F	7-A	7-B	7-C	7-D	7-E	7-F	7-G	7-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1		
	8-A	8-B	8-C	8-D	8-A	8-B	8-C	8-D	8-E	8-F	8-A	8-B	8-C	8-D	8-E	8-F	8-G	8-H		
	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1	1x1		

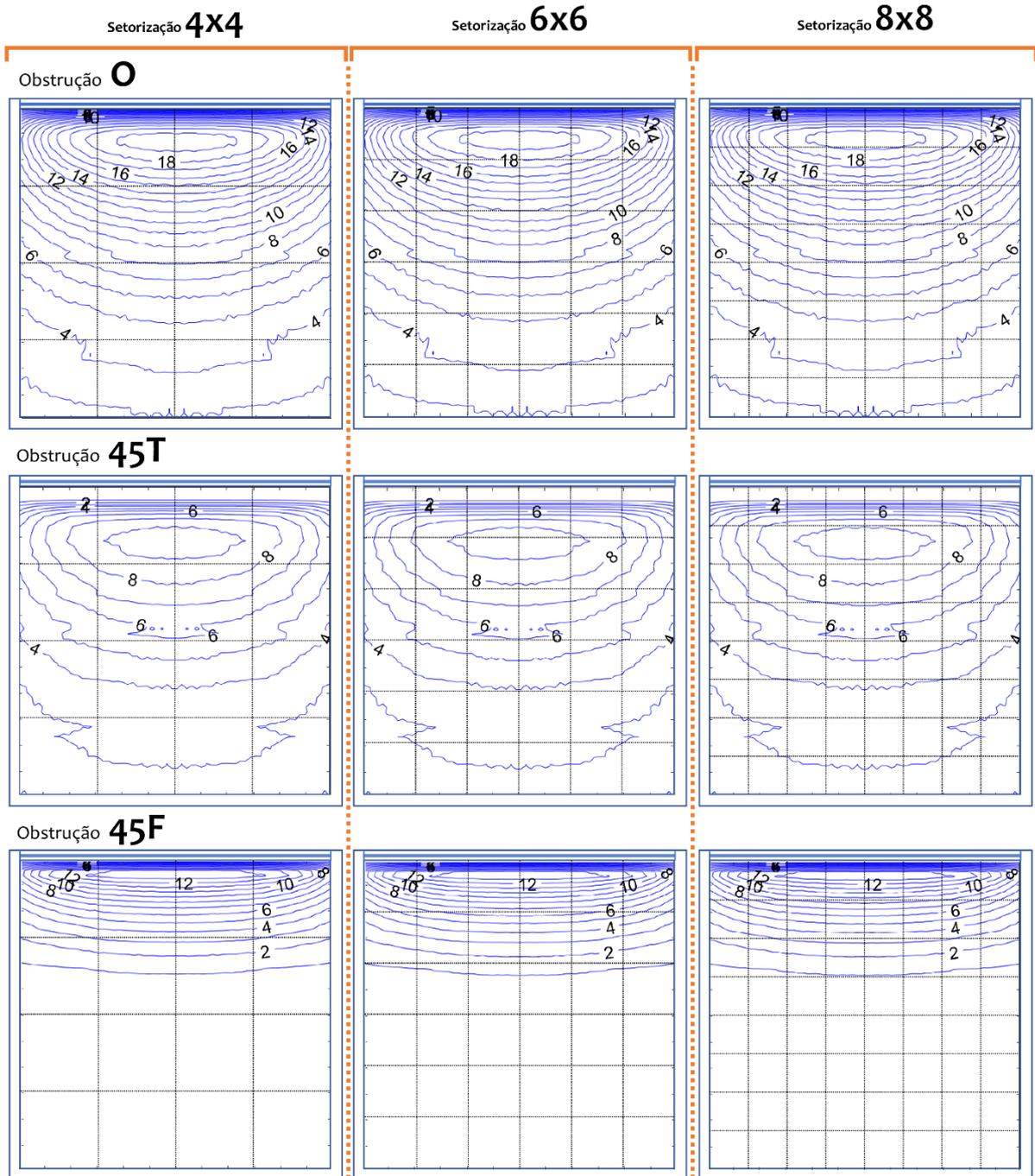
Fonte: Elaborada pelo autor

Quando analisadas as quantidades de pontos em todo o plano de trabalho observa-se que ela é maior do que nos demais modelos analisados. Ao passo que aumenta a setorização a quantidade de pontos na primeira metade do plano de trabalho aumenta consideravelmente, mais do que nas demais situações de obstrução externa. Esse comportamento se dá principalmente na orientação sul, em que a trajetória solar aparente faz com que a região em destaque esteja sob influência da radiação solar direta em um período do ano. Observa-se ainda que o aumento na quantidade de pontos é menor para as latitudes maiores, como a da cidade de Porto Alegre, por causa da trajetória solar. Novamente, como nos casos anteriores, observa-se que a maior quantidade de setores implica sempre em mais pontos de análise e que, para a situação atual, a setorização com menos pontos é a de 4x4.

As análises até esse ponto indicam que a visão de céu influencia diretamente no comportamento da quantidade de pontos para cada setorização. Foram estudados dois parâmetros de análise, o fator de visão de céu (FVC) e o fator de céu ponderado (FCP). O primeiro analisa a área de céu visível a partir do ponto de observação, enquanto o segundo faz uma ponderação dessa área com relação à altura solar. Os dois parâmetros possuem comportamento semelhante e sua diferença será novamente estudada na análise estatística. Para

verificar como eles se comportam frente à variação da setorização a Figura 53 apresenta a variação do FVC para os três modelos de obstrução externa e para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8.

Figura 53 - FVC para os modelos do tipo 0, 45T e 45F com distância entre os níveis de 1%, sobrepostos com as divisões das setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8.



Fonte: Elaborada pelo autor

A figura permite identificar as regiões com grande alteração do FVC, que se concentram junto à parede da abertura. Essa grande variação da visão de céu faz com que os resultados da componente direta variem muito dentro do setor ao passo que se aumenta a quantidade de pontos na região, fazendo com que sejam necessárias malhas com cada vez mais pontos para a estabilização do resultado de iluminância.

Para os modelos sem obstrução externa (0) as linhas de FVC se distribuem ao longo de todo o plano de trabalho, o que explica a ocorrência de setores com mais de um ponto mesmo em regiões mais distantes da janela. Para os modelos com obstrução de topo (45T) é possível observar que a região abaixo da janela possui menos linhas de nível que as demais, sendo uma região sem visão de céu em decorrência da marquise, o que faz com que a quantidade de pontos nos setores nessa região seja sempre a menor se comparada às demais situações de obstrução.

O modelo com obstrução frontal (45F) concentra as linhas de nível de FVC na primeira metade do ambiente, o que também acontece com o FCP. Esse comportamento decorre do fato de o muro externo bloquear a visão de céu do horizonte a partir da metade do ambiente, fazendo com que toda a parte posterior não tenha visão de céu. Esse comportamento reflete-se na quantidade de pontos por setor, que na região do plano de trabalho mais distante da abertura é sempre um enquanto que na mais próxima aumenta conforme se aproxima da abertura.

Tais comportamentos permitem sugerir que a visão de céu é fator determinante no cálculo da iluminância direta e na definição da quantidade de pontos necessária para que o valor de iluminância se estabilize dentro do setor. Para o estudo da quantidade de pontos é apresentada na **Tabela 8** um esquema de como o total de pontos no plano de trabalho se distribui nos modelos estudados.

Os resultados apontam que as setorizações com picos de quantidades de pontos, indicadas em amarelo e vermelho, encontram-se para os modelos com obstrução de frente (45F), em que sua maioria precisa de mais de 100 pontos no plano de trabalho para estabilização dos resultados de iluminância. Os maiores valores acontecem comumente para setorizações maiores que 6x6 para a componente de sol direto e de 5x5 para a componente direta total e céu direto.

Em todos os casos os modelos que obtiveram a menor quantidade de pontos foram aqueles com obstrução de topo (45T), que possuem menor visão de céu nos pontos do plano de trabalho. Tal comportamento não permite afirmar que a visão de céu analisada de forma global se relaciona diretamente com a quantidade de pontos, se assim fosse o modelo sem obstrução

seria aquele que necessitaria de mais pontos, o que não acontece. Entretanto, a análise local, setor a setor, associada à variação da visão de céu dentro do setor, mostrou relação importante com a quantidade de pontos necessária para estabilização dos resultados de iluminância.

Tabela 8 - Quantidade de pontos total no plano de trabalho para os modelos analisados no estudo da iluminância direta.

			CD+SD					CD					SD				
			4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	4x4	5x5	6x6	7x7	8x8
o	L	Mp	101	131	87	131	297	94	101	146	153	134	93	100	84	111	302
		Mc	324	134	100	154	345	94	101	146	145	134	131	131	55	128	406
		Vt	101	105	84	120	240	94	112	140	113	131	93	100	52	71	120
		PA	96	95	84	123	223	94	111	132	105	128	82	93	52	69	117
	S	Mp	163	187	222	265	276	110	125	116	153	148	79	208	303	305	454
		Mc	53	65	183	276	279	110	125	136	153	140	79	164	340	318	487
		Vt	37	139	195	241	262	94	115	134	129	134	72	181	196	239	336
		PA	37	88	195	233	262	94	125	141	121	134	65	89	125	225	339
45F	L	Mp	136	150	134	268	285	106	427	326	464	192	129	148	103	329	245
		Mc	136	147	122	299	370	106	427	326	436	192	129	188	103	381	352
		Vt	136	150	107	207	213	124	427	354	445	192	129	122	91	285	128
		PA	129	157	107	237	274	124	427	354	445	192	129	119	94	300	146
	S	Mp	92	269	504	624	332	124	455	354	508	192	76	208	287	309	401
		Mc	45	407	491	690	340	124	455	354	508	198	139	171	335	318	472
		Vt	136	533	432	616	343	136	455	354	511	209	69	173	188	243	379
		PA	130	209	408	616	343	172	455	354	511	209	62	89	122	232	379
45T	L	Mp	104	116	84	117	256	88	140	92	159	100	84	64	84	121	202
		Mc	232	132	84	143	273	88	140	92	151	97	66	109	109	161	121
		Vt	85	94	84	108	247	82	124	84	131	88	49	52	84	113	196
		PA	90	68	84	108	196	82	124	84	117	88	56	52	84	108	118
	S	Mp	110	133	103	191	253	110	119	103	191	226	22	84	57	60	67
		Mc	149	140	100	198	210	149	140	100	198	210	25	87	57	57	82
		Vt	88	124	84	147	256	88	124	84	147	192	25	87	57	57	79
		PA	88	119	84	154	208	88	119	84	154	256	22	57	57	52	67

<100
 100 - 200
 200 - 300
 300 - 400
 >400

Fonte: Elaborada pelo autor

Percebe-se ainda que os modelos com abertura orientada a sul necessitam de mais pontos que aqueles orientados a leste, esse comportamento se dá pelo maior contraste entre regiões claras, perto da janela, e escuras, mais ao fundo, para a janela orientada a sul que a leste. Tal resultado corrobora com a ideia de que as diferenças dentro do setor, seja de iluminância ou de visão de céu, determinam a quantidade de pontos necessários para a estabilização da média.

5.2.1.2 Malha para cálculo da componente refletida

Para a apresentação dos resultados da componente refletida serão utilizados os mesmos modelos e parâmetros de processamentos apresentados para a componente direta. Tendo em vista o volume de resultados foram escolhidos aqueles que melhor representam o comportamento geral das simulações. Na Figura 54 são apresentados os resultados para as componentes refletida total, céu refletido (CR) e sol refletido (SR) para as cidades de Macapá e Vitória nas setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8.

Figura 54 - Resultados da MSmin para as cidades de Macapá e Vitória nos modelos sem obstrução de entorno e para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8

		CR Céu Refletido + SR Sol Refletido				CR Céu Refletido				SR Sol Refletido			
		34 Pontos				31 Pontos				19 Pontos			
Cidade	MACAPÁ	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D
	0° 13'N	1X1	1X1	2X2	2X2	1X1	1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	2X2	1X1
Orientação	LESTE	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D
		1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1
Obstrução	0	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D
		1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1
		4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D
		1X1	2X2	2X2	1X1	2X2	2X2	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1
Cidade	MACAPÁ	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D
	0° 13'N	1X1	1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	2X2	2X2	1X1	1X1	1X1
Orientação	SUL	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D
		1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1
Obstrução	0	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D
		1X1	2X2	2X2	1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1	2X2	1X1
		4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D
		1X1	2X2	1X1	1X1	2X2	2X2	2X2	2X2	1X1	1X1	2X2	2X2
Cidade	PORTO A.	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D
	30° 04'S	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1
Orientação	LESTE	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D
		1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1
Obstrução	0	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D
		1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1
		4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D
		1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	2X2	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1
Cidade	PORTO A.	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D
	30° 04'S	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1
Orientação	SUL	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D
		1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1
Obstrução	0	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D
		1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1
		4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D	4-A	4-B	4-C	4-D
		1X1	2X2	1X1	1X1	1X1	2X2	2X2	1X1	1X1	1X1	1X1	1X1

Fonte: Elaborada pelo autor

Todos os resultados de quantidade de pontos total no plano de trabalho apresentaram-se menores para a malha refletida se comparada à malha direta e os valores por setorização também acompanharam o mesmo comportamento. Observa-se, entretanto, que a distribuição dos setores com mais de um ponto ao longo do plano de trabalho é diferente da direta, principalmente nos modelos sem obstrução externa. Tais setores estão distribuídos de forma dispersa, sem um comportamento predominante exceto nos modelos com obstrução.

O comportamento, quando comparadas as componentes de céu e de sol é semelhante, sendo necessário, na maioria dos casos, menos pontos para a malha da componente de sol para estabilizar os valores de iluminância. A orientação da abertura também foi um parâmetro que pouco influenciou nos resultados de quantidades totais de pontos, incorrendo em casos onde ambas as orientações possuem mesmo comportamento dos pontos no plano de trabalho.

Quando verificada a influência da latitude observa-se mesmo comportamento identificado para a componente direta. Ao passo que aumenta a latitude a quantidade de pontos de análise diminui em todos os casos estudados. Para a cidade de Porto Alegre, de maior latitude nos estudos, em alguns casos toda a setorização possui apenas um ponto por setor, o que não acontece em nenhuma situação para a componente direta.

O parâmetro que implica diferença de forma mais evidente nos resultados é a obstrução de entorno. Para a apresentação serão usados os mesmos modelos e cidades da utilizada na malha direta. Os resultados para o modelo sem obstrução de externa é apresentado na Figura 55. Inicialmente observa-se mesmo comportamento apresentado anteriormente, com setores com mais de um ponto ocorrendo de forma dispersa pelo plano de trabalho. Uma análise detalhada dos resultados permite observar que a tais setores, em sua maioria, vão estar localizados sempre nas bordas do plano de trabalho, junto às paredes, e que a posição da abertura, para os modelos sem obstrução externa, aparentemente não influi em tal comportamento. Os modelos com maior setorização (7x7 e 8x8) foram aqueles em o comportamento citado foi mais evidente, permitindo verificar que setores menores e próximos às superfícies refletoras são aqueles com maior probabilidade de necessitarem de mais pontos para a estabilização dos resultados de iluminância.

Nos modelos com obstrução externa o comportamento dos resultados é semelhante ao que se apresenta nos resultados da componente direta, estando apresentados os dados do modelo com obstrução de frente (45F) na Figura 56, com obstrução de topo (45T) na Figura 57 e os com obstrução total (90) na Figura 58.

Figura 55 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo sem obstrução externa (0) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8

		Setorização 4x4				Setorização 6x6						Setorização 8x8								
Cidade VITÓRIA 20° 18'S	Orientação LESTE	Obstrução 0	19 Pontos				42 Pontos						87 Pontos							
			1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H
			2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H
			3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-G	3-H
Cidade VITÓRIA 20° 18'S	Orientação SUL	Obstrução 0	19 Pontos				39 Pontos						84 Pontos							
			1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H
			2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H
			3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-G	3-H

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 56 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo com obstrução de frente (45F) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8

		Setorização 4x4				Setorização 6x6						Setorização 8x8								
Cidade VITÓRIA 20° 18'S	Orientação LESTE	Obstrução 45F	67 Pontos				99 Pontos						108 Pontos							
			1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H
			2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H
			3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-G	3-H
Cidade VITÓRIA 20° 18'S	Orientação SUL	Obstrução 45F	58 Pontos				93 Pontos						117 Pontos							
			1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H
			2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H
			3-A	3-B	3-C	3-D	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F	3-G	3-H

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 57 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo com obstrução de frente (45F) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8

		Setorização 4x4				Setorização 6x6						Setorização 8x8									
Cidade VITÓRIA 20° 18'S	Orientação LESTE	Obstrução 45T	79 Pontos				90 Pontos						98 Pontos								
			1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H	
			4x4	4x4	4x4	4x4	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	2x2	3x3						
			2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H	
Cidade VITÓRIA 20° 18'S	Orientação SUL	Obstrução 45T	76 Pontos				87 Pontos						98 Pontos								
			1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H	
			4x4	4x4	4x4	4x4	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	3x3	
			2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H	

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 58 - Resultados da MSmin para a cidade de vitória no modelo com obstrução de frente (45F) para as setorizações de 4x4, 6x6 e 8x8

		Setorização 4x4				Setorização 6x6						Setorização 8x8									
Cidade VITÓRIA 20° 18'S	Orientação LESTE	Obstrução 90	55 Pontos				90 Pontos						91 Pontos								
			1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H	
			3x3	3x3	4x4	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2
			2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H	
Cidade VITÓRIA 20° 18'S	Orientação SUL	Obstrução 90	52 Pontos				87 Pontos						94 Pontos								
			1-A	1-B	1-C	1-D	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-H	
			2x2	2x2	4x4	4x4	2x2	3x3	3x3	3x3	3x3	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2
			2-A	2-B	2-C	2-D	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E	2-F	2-G	2-H	

Fonte: Elaborada pelo autor

Todos os modelos com resultados para a obstrução de entorno apresentam os setores mais próximos à janela com maior quantidade de pontos que os demais. Interessante notar que na setorização de 8x8 as linhas 1 e 2, mais próximas à abertura, correspondem à mesma área da linha 1 na setorização de 4x4. Os resultados para a setorização 4x4 apresentam na linha 1 uma região em que sempre se faz necessário mais de um ponto por setor, chegando a até 16 pontos por setor, entretanto, quando comparados com os resultados da setorização de 8x8 observa-se que apenas os setores da linha mais próxima à janela apresentam setores com mais de um ponto, indicando que essa região da borda do plano de trabalho e próxima à parede da abertura é a que causa a instabilidade nos valores de iluminância.

No restante do plano de trabalho o comportamento dos setores com mais de um ponto não apresenta comportamento uniforme, ainda assim observa-se a ocorrência destes nas bordas do plano de trabalho. Um fato importante é que os setores de ponta, como o 8-A da setorização 8x8, o 6-A da setorização 6x6 e o 4-A da setorização 4x4 apresentaram ocorrências de mais de um ponto por setor em diversos modelos, o que reforça a ideia de que a proximidade com as superfícies refletoras é um parâmetro importante na definição da quantidade de pontos.

A malha da componente refletida apresentou valores de quantidades de pontos inferior à da malha direta, em que mais de 65% dos modelos necessitaram de menos de 100 pontos para atingir a estabilidade nos valores de iluminância. Os resultados de quantidades de pontos para a malha refletida são apresentados na Tabela 9.

É possível observar que o modelo sem obstrução externa foi aquele que obteve as menores quantidades de pontos no plano de trabalho, enquanto que os com obstrução parcial (45F e 45T) foram os que apresentaram mais pontos. Importante destacar que o intervalo de quantidade de pontos da malha direta vai de 22 a 616, enquanto que o da malha refletida vai de 16 a 319, indicando que os intervalos de comportamentos das duas diferem entre si. A maioria dos resultados para a malha direta está próxima dos 150 pontos, enquanto que na refletida em torno dos 80 pontos.

Tabela 9 - Quantidade de pontos total no plano de trabalho para os modelos analisados no estudo da iluminância refletida

		CD+SD					CD					SD					
		4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	
0	L	Mp	34	48	68	120	112	31	55	48	78	82	19	31	39	73	76
		Mc	31	43	63	103	97	31	49	45	72	82	19	31	39	73	79
		Vt	19	34	42	78	82	28	46	42	69	79	16	31	36	52	67
		PA	19	28	39	75	82	28	37	42	69	79	16	25	36	52	64
	S	Mp	28	45	53	75	110	37	58	48	78	88	28	54	62	70	104
		Mc	25	40	45	72	104	34	55	48	78	91	28	48	54	67	104
		Vt	19	43	39	61	84	28	55	45	69	79	19	58	47	52	84
		PA	19	34	39	58	84	31	46	45	69	79	16	31	47	52	75
45F	L	Mp	88	110	141	189	166	82	103	117	151	130	56	75	100	142	108
		Mc	75	95	113	184	141	85	109	117	154	139	46	68	103	162	111
		Vt	72	72	102	146	108	82	100	99	138	122	28	51	80	103	84
		PA	55	67	99	141	94	82	100	105	138	130	28	48	85	97	73
	S	Mp	61	108	124	189	154	88	109	105	144	133	36	86	105	118	126
		Mc	70	113	116	170	145	88	112	108	151	142	33	68	108	112	114
		Vt	58	82	96	132	128	85	103	99	144	133	28	48	77	87	97
		PA	55	77	93	125	109	85	109	99	144	133	28	48	77	81	85
45T	L	Mp	88	319	99	125	140	87	173	110	121	116	76	151	84	113	93
		Mc	82	81	96	108	122	89	91	110	109	107	62	68	84	105	93
		Vt	79	71	90	108	103	68	85	96	106	104	40	65	84	105	88
		PA	76	71	87	108	98	68	85	96	106	104	40	65	84	105	88
	S	Mp	79	121	93	108	109	99	179	105	118	130	62	163	84	105	91
		Mc	79	71	93	108	98	96	99	105	120	127	48	65	84	105	88
		Vt	69	68	87	105	98	90	88	99	106	110	40	65	79	100	88
		PA	69	68	84	105	98	90	88	99	106	110	32	65	79	100	88
90	L	Mp	82	74	106	99	124	76	88	158	125	176	38	50	67	73	100
		Mc	76	74	108	102	100	79	97	172	138	248	38	40	57	73	94
		Vt	69	60	90	85	94	76	74	128	125	138	38	45	54	73	85
		PA	62	60	87	85	94	76	74	128	125	138	38	45	54	70	85
	S	Mp	69	67	87	82	102	76	71	146	128	136	43	46	65	82	88
		Mc	69	72	77	87	97	79	91	177	138	208	38	43	54	73	91
		Vt	55	45	77	73	91	76	71	130	106	133	38	40	54	70	85
		PA	48	43	77	70	91	76	71	130	106	130	33	40	54	70	85

<50
 50 - 100
 100 - 150
 150 - 200
 >200

Fonte: Elaborada pelo autor

Alguns modelos apresentaram valores de pico de quantidade de pontos, ultrapassando os 200, indicando que o tratamento de valores espúrios utilizado não conseguiu identificar todas as situações de variações ocorridas nas simulações. Os picos ocorrem nos setores próximos à parede da abertura, na primeira linha. O comportamento dos resultados e sua relação com a

distância a abertura serão tratados na análise estatística, tendo em vista que é um parâmetro que não varia em função da obstrução externa, como no caso dos FVC e FCP.

Os resultados dessa etapa permitem verificar que os comportamentos das malhas direta e refletida são distintos entre si, sendo a sendo a primeira a que necessita de mais pontos de análise para estabilização dos valores de iluminância. A latitude foi o fator que menos influenciou na forma como os pontos são distribuídos no plano de trabalho, entretanto, foi determinante na quantidade total de pontos, onde ao passo que ela aumenta, para todos os modelos estudados, a quantidade diminui.

A obstrução externa mostrou-se determinante para o estudo da setorização nos modelos de malha direta, indicando uma relação entre os parâmetros de FVC e FCP, a setorização ideal e a definição da densidade de pontos por setor. No caso da malha refletida sua presença fez com que aumentasse a necessidade de mais pontos, principalmente na primeira linha, próxima à parede da abertura.

A orientação foi indicativa de comportamento principalmente na malha direta, enquanto que na refletida não se observou alterações significativas nos resultados com a sua mudança. A obstrução de entorno foi um parâmetro importante no estudo do comportamento da setorização, pois alterou a região com incidência de luz solar na malha direta, fazendo com que as regiões com maior visão de céu fossem aquelas que necessitassem de mais pontos de análise.

Dois comportamentos são importantes de serem destacados, o primeiro relativo à malha direta. Observou-se uma relação próxima entre o comportamento do FVC (e FCP) e os setores que apresentaram necessidade de mais de um ponto de análise para estabilização dos valores de iluminância. Aqueles setores em que há muita variação dos parâmetros citados tendem a necessitar de mais pontos que os demais. O segundo, relativo à malha refletida, indica que a proximidade dos pontos de análise com as paredes do modelo fez com que houvesse necessidade de mais pontos, em tais setores. Essas duas inferências poderão ser melhor analisadas na análise estatística.

Por fim destaca-se que o tratamento de valores espúrios utilizado é um ponto importante de análise, pois em alguns casos ainda permaneceram pontos de pico na quantidade de pontos, principalmente observados na malha da componente direta.

5.2.2 Análise estatística

A análise estatística dos resultados seguirá em duas etapas, na primeira será abordada a setorização do plano de trabalho, na segunda são apresentados os resultados e análises para a quantidade de pontos dentro do setor, tendo como base a setorização ‘ideal’ identificada na primeira.

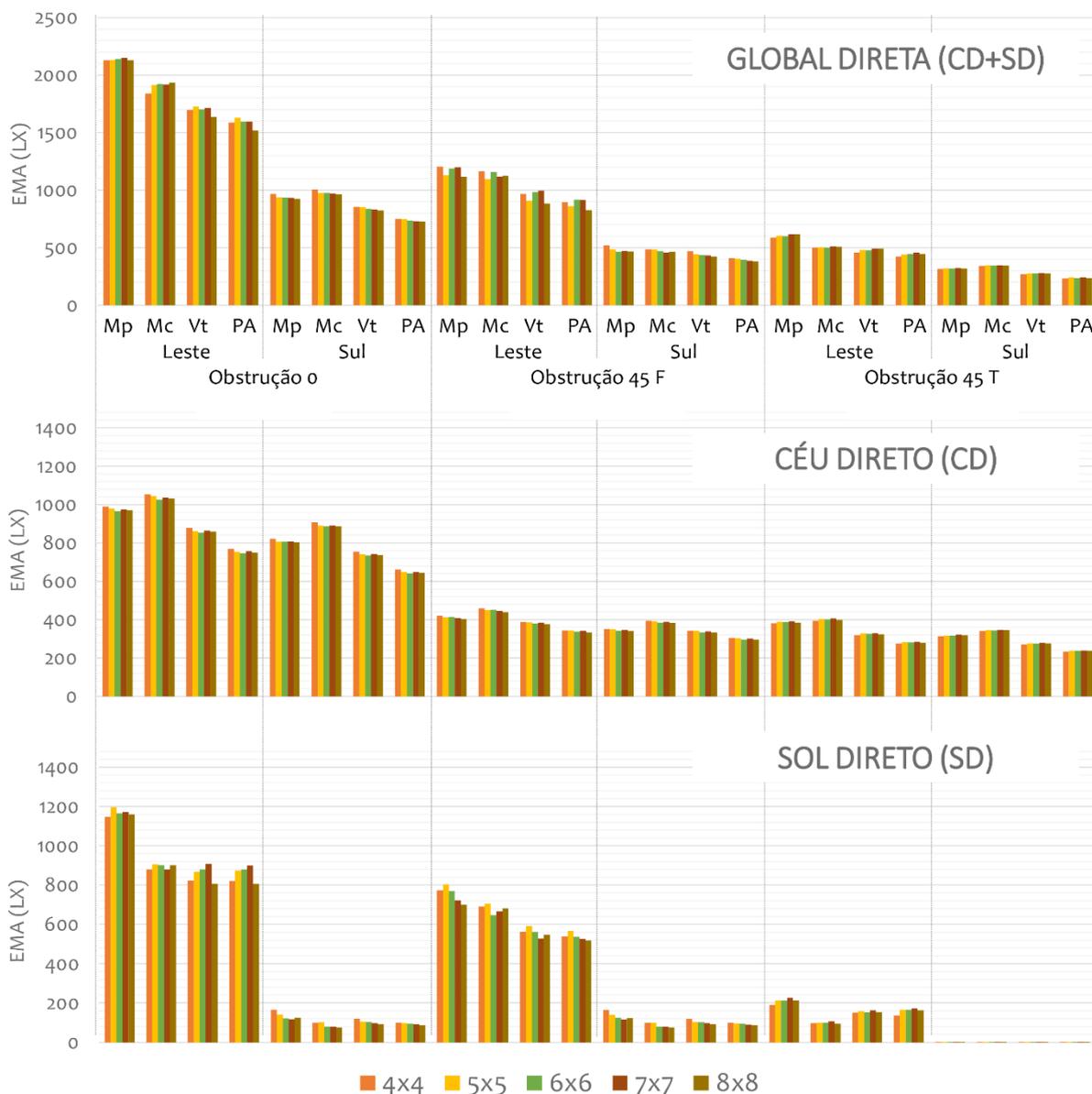
5.2.2.1 Setorização do plano de trabalho - Malha direta

O estudo da setorização será dividido em duas etapas referentes às malhas de processamento direta e refletida. Os métodos utilizados nas duas etapas são apresentados na mesma ordem. Por fim é apresentada a síntese dos resultados com a setorização tida como recomendada para o estudo.

Para verificar a influência da setorização nos valores de EMA foi utilizada a MSmin citada anteriormente. A partir dela foram calculados os valores de EMA direta e suas componentes de céu (CD) e sol (SD) para todo o plano de trabalho, cujos gráficos para todos os modelos e setorizações são apresentados na Figura 59.

Observa-se que a variação da setorização possui pouca influência na EMA global direta e em suas componentes na MSmin. Ao passo que se aumenta a quantidade de setores há pouca variação na EMA em todo o plano de trabalho. As variáveis de latitude, orientação da abertura e obstrução externa apresentaram variações no valor da EMA entre elas, como já era esperado, entretanto, elas não afetaram o comportamento frente à setorização, como citado anteriormente. Na maioria dos casos é possível observar ligeira redução da EMA com o aumento da setorização, apenas em casos específicos, como nos modelos com obstrução de topo (45T).

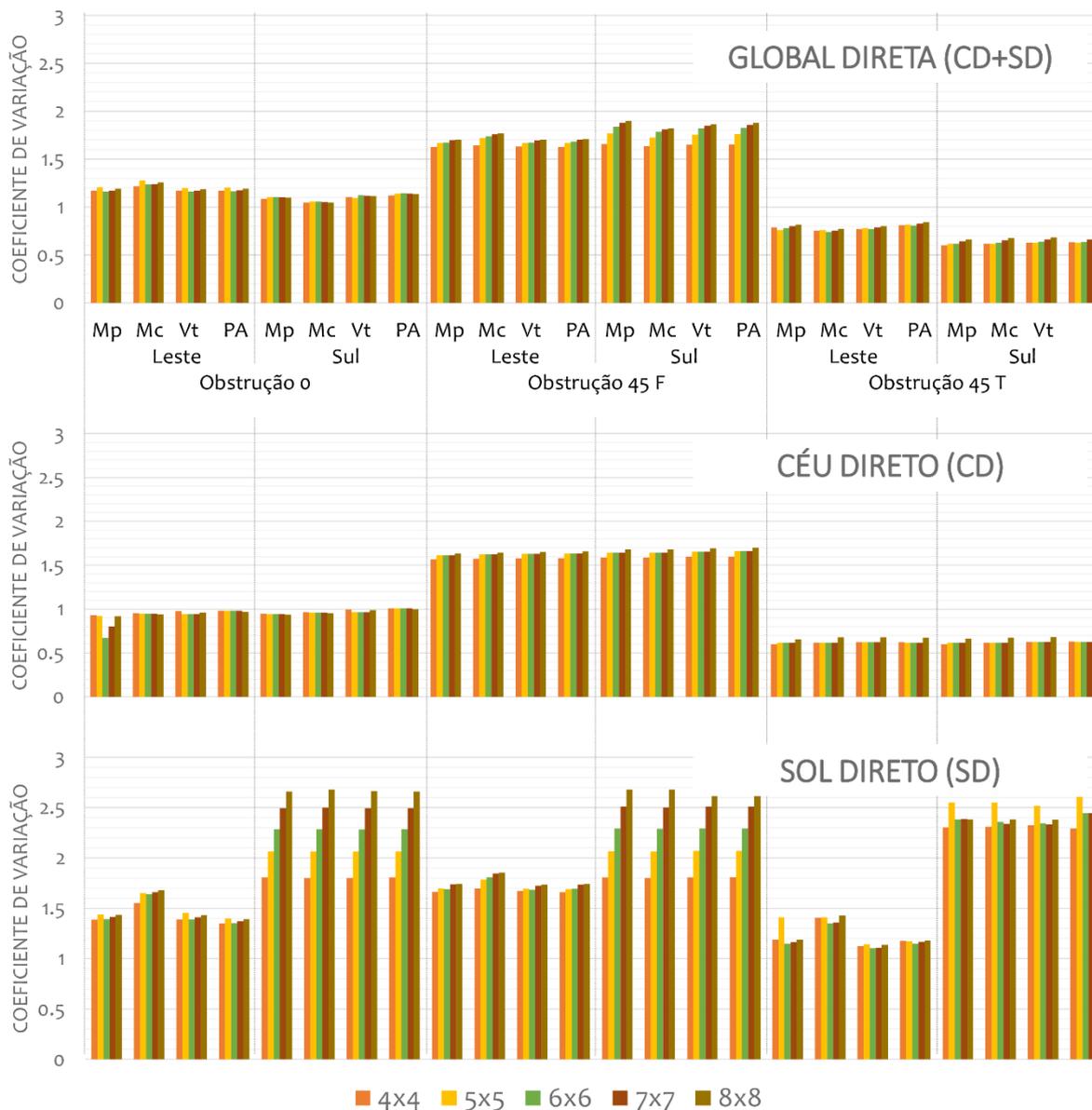
Figura 59 – EMA direta (CD+SD) e suas componentes céu direto (CD) e sol direto (SD) para todos os modelos e variações de setores



Fonte: Elaborada pelo autor

O valor da EMA é pouco eficiente na identificação das variações locais no plano de trabalho em cada setor, para tal verificação foi calculado o coeficiente de variação (CV) dos valores de cada setor, dentro de cada combinação de setorização. O CV é utilizado apenas para fins de comparação entre as diferentes setorizações e não como valor isolado. Os resultados são apresentados na Figura 60.

Figura 60- Coeficiente de Variação da EMA direta (CD+SD) e suas componentes céu direto (CD) e sol direto (SD) para todos os modelos e variações de setores



Fonte: Elaborada pelo autor

O CV apresenta comportamento semelhante ao da iluminância com pouca variação, principalmente para a componente céu direto. Para a componente de sol direto observa-se maiores variações, principalmente nos modelos com janela orientada a sul. A componente de sol direto (SD) para os modelos orientados a leste apresentou variação menor do CV entre setorizações. A pequena variação tanto de EMA quanto de CV no setor mostra que o método para definição da MSmin seguiu uma metodologia que permitiu definir de forma consistente a quantidade de pontos necessários para a caracterização do comportamento da iluminância em cada situação.

Numa segunda etapa foram realizadas análises estatísticas a fim de verificar se os valores obtidos para diferentes setorizações e apresentados anteriormente podem ser considerados semelhantes. Inicialmente foi calculado o coeficiente de variação entre as médias de cada situação de setorização, tanto para a componente direta total da EMA quanto para o CV da EMA calculado anteriormente. Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Coeficientes de variação para as diferentes setorizações, calculados a partir dos dados de EMA e CV para a EMA direta e suas componentes.

			CD+SD		CD		SD	
			E	DP	E	DP	E	DP
0	L	Mp	0,5%	1,5%	1,0%	13,2%	1,6%	1,7%
		Mc	2,0%	1,8%	1,0%	0,4%	1,5%	2,9%
		Vt	2,1%	1,1%	1,1%	1,5%	4,8%	2,0%
		PA	2,6%	1,3%	1,1%	0,4%	4,7%	1,6%
	S	Mp	1,7%	0,7%	0,9%	0,4%	15,1%	15,0%
		Mc	1,7%	0,4%	1,0%	0,4%	14,8%	15,3%
		Vt	1,5%	1,0%	1,1%	1,5%	9,6%	15,1%
		PA	1,4%	0,8%	1,2%	0,4%	5,6%	15,0%
45F	L	Mp	3,5%	1,8%	1,6%	1,5%	5,5%	2,0%
		Mc	2,4%	2,9%	1,7%	1,6%	3,4%	3,5%
		Vt	5,2%	1,6%	1,2%	1,7%	4,2%	1,6%
		PA	4,4%	1,9%	1,2%	1,7%	3,5%	2,0%
	S	Mp	4,6%	5,4%	1,3%	2,0%	14,7%	15,3%
		Mc	2,5%	4,4%	1,2%	2,0%	14,8%	15,3%
		Vt	4,0%	4,9%	1,2%	2,1%	9,6%	15,4%
		PA	3,0%	5,0%	1,3%	2,2%	5,5%	15,3%
45T	L	Mp	2,1%	2,7%	1,1%	3,6%	6,0%	8,8%
		Mc	1,0%	1,5%	1,2%	4,2%	4,7%	2,5%
		Vt	3,0%	1,6%	1,3%	3,9%	3,1%	1,5%
		PA	3,0%	1,7%	1,3%	3,8%	9,1%	1,0%
	S	Mp	0,9%	3,8%	0,9%	3,7%	12,3%	3,8%
		Mc	0,7%	4,1%	0,7%	4,3%	19,1%	4,0%
		Vt	1,1%	3,7%	1,1%	3,9%	16,5%	3,4%
		PA	1,1%	3,5%	1,1%	3,8%	14,7%	4,6%

<5%
 5 a 10%
 10 a 20%
 20 a 30%
 >40%

Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que os valores do CV são baixos, em sua maioria menores que 5%, independente do modelo analisado e das variações de cidade, orientação e obstrução externa. A componente de sol direto é aquela que apresenta os maiores valores de CV, seja para a EMA ou para o CV da EMA por setor.

Para validar as inferências anteriores foram realizados testes de ANOVA nas setorizações. Para o teste os dados foram agrupados por obstrução de entorno (0, 45T e 45F). O agrupamento faz-se necessário a fim de fixar a variável geométrica e analisar, para cada caso do teste, as variações externas. Os resultados apontam que as médias são estatisticamente iguais independente da setorização, confirmada pelo teste de Tukey. Sabendo que as médias são estatisticamente semelhantes para todas as setorizações, faz-se necessário definir a setorização ideal para o caso em estudo. O critério utilizado para definir a melhor setorização o de menor quantidade de pontos no plano de trabalho, permitindo que sejam utilizados menos pontos de processamento com a mesma precisão de resultado. As setorizações com menos pontos, a quantidade de pontos para cada setorização e a densidade de setores por metro quadrado (ρ_s) para todos os modelos, é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Setorização ideal para cada modelo estudado e cada componente, calculada a partir da quantidade de pontos.

			Setorização			Pontos (CD+SD)			Indicada	
			CD+SD	CD	SD	4x4	5x5	6x6	Setores	ρ_s (set/m ²)
0	L	Mp	6x6	4x4	6x6	101	131	87	6x6	1,0
		Mc	6x6	4x4	6x6	324	134	100	6x6	1,0
		Vt	6x6	4x4	6x6	101	105	84	6x6	1,0
		PA	6x6	4x4	6x6	96	95	84	6x6	1,0
	S	Mp	4x4	4x4	4x4	163	187	222	4x4	0,4
		Mc	4x4	4x4	4x4	53	65	183	4x4	0,4
		Vt	4x4	4x4	4x4	37	139	195	4x4	0,4
		PA	4x4	4x4	4x4	37	88	195	4x4	0,4
45F	L	Mp	6x6	4x4	6x6	136	150	134	6x6	1,0
		Mc	6x6	4x4	6x6	136	147	122	6x6	1,0
		Vt	6x6	4x4	6x6	136	150	107	6x6	1,0
		PA	6x6	4x4	6x6	129	157	107	6x6	1,0
	S	Mp	4x4	4x4	4x4	92	269	504	4x4	0,4
		Mc	4x4	4x4	4x4	45	407	491	4x4	0,4
		Vt	4x4	4x4	4x4	136	533	432	4x4	0,4
		PA	4x4	4x4	4x4	130	209	408	4x4	0,4
45T	L	Mp	6x6	4x4	5x5	104	116	84	6x6	1,0
		Mc	6x6	4x4	4x4	232	132	84	6x6	1,0
		Vt	6x6	4x4	4x4	85	94	84	6x6	1,0
		PA	5x5	4x4	5x5	90	68	84	5x5	0,7
	S	Mp	6x6	6x6	4x4	110	133	103	6x6	1,0
		Mc	6x6	6x6	4x4	149	140	100	6x6	1,0
		Vt	6x6	6x6	4x4	88	124	84	6x6	1,0
		PA	6x6	6x6	4x4	88	119	84	6x6	1,0

Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados anteriores já apontam que a latitude do modelo para a amplitude estudada, não apresenta influência significativa na setorização, mas que a orientação da abertura e a obstrução externa sim. Observa-se que para os modelos orientados a leste há tendência de setorizações maiores, enquanto que para os modelos orientados a sul as setorizações ideais são menores. Apenas para os modelos com obstrução de topo (45T) os resultados foram semelhantes para ambas as orientações de abertura, variando entre setorizações de 5x5 e 6x6.

Os dados apresentados indicam ainda que a setorização ideal assemelha-se, para todos os casos à setorização da componente global direta (CD+SD), permitindo que seja possível assumir essa como a indicada. Para concluir a análise e definir melhor a setorização para a componente direta foram analisadas as quantidades de pontos das setorizações de 4x4, 5x5 e 6x6. Nos modelos com abertura orientada a sul (S) há uma tendência de aumento na quantidade de pontos com o aumento da setorização. Na maioria dos modelos as setorizações com menos pontos variam entre 4x4 e 6x6. Para os modelos com obstrução de topo (45T) a diferença na quantidade de pontos para setorizações de 5x5 e 6x6 é pequena, não chegando a 15%, fazendo com que se possa admitir, para tal caso, a setorização de 6x6 como ideal, seguindo o comportamento dos demais modelos de mesma orientação.

Já nos modelos orientados a leste (L) com obstrução de topo (45T) o comportamento é distinto dos demais de mesma orientação. Para aqueles em que as partes mais altas do céu não estão obstruídas (0 e 45F) a quantidade de pontos é maior do que aqueles onde o céu é obstruído pela marquise (45T), necessitando de menos pontos. Aqui é importante observar que a componente de sol direto, importante no cálculo de métricas como a ASE, sofrerá os impactos da setorização mais do que outras métricas. Um parâmetro importante de generalização dos modelos é a densidade de setores. Para modelos orientados a leste, em que há penetração da luz direta mais fundo no ambiente, a setorização varia em densidade de 0,7 a 1,0 set/m², enquanto que os modelos orientados a sul a variação é entre 0,4 a 1,0 set/m². Importante destacar que tais variações são mais evidentes apenas em situações onde há obstrução de topo (45T) onde os pontos de análise veem apenas regiões do céu mais próximas ao horizonte.

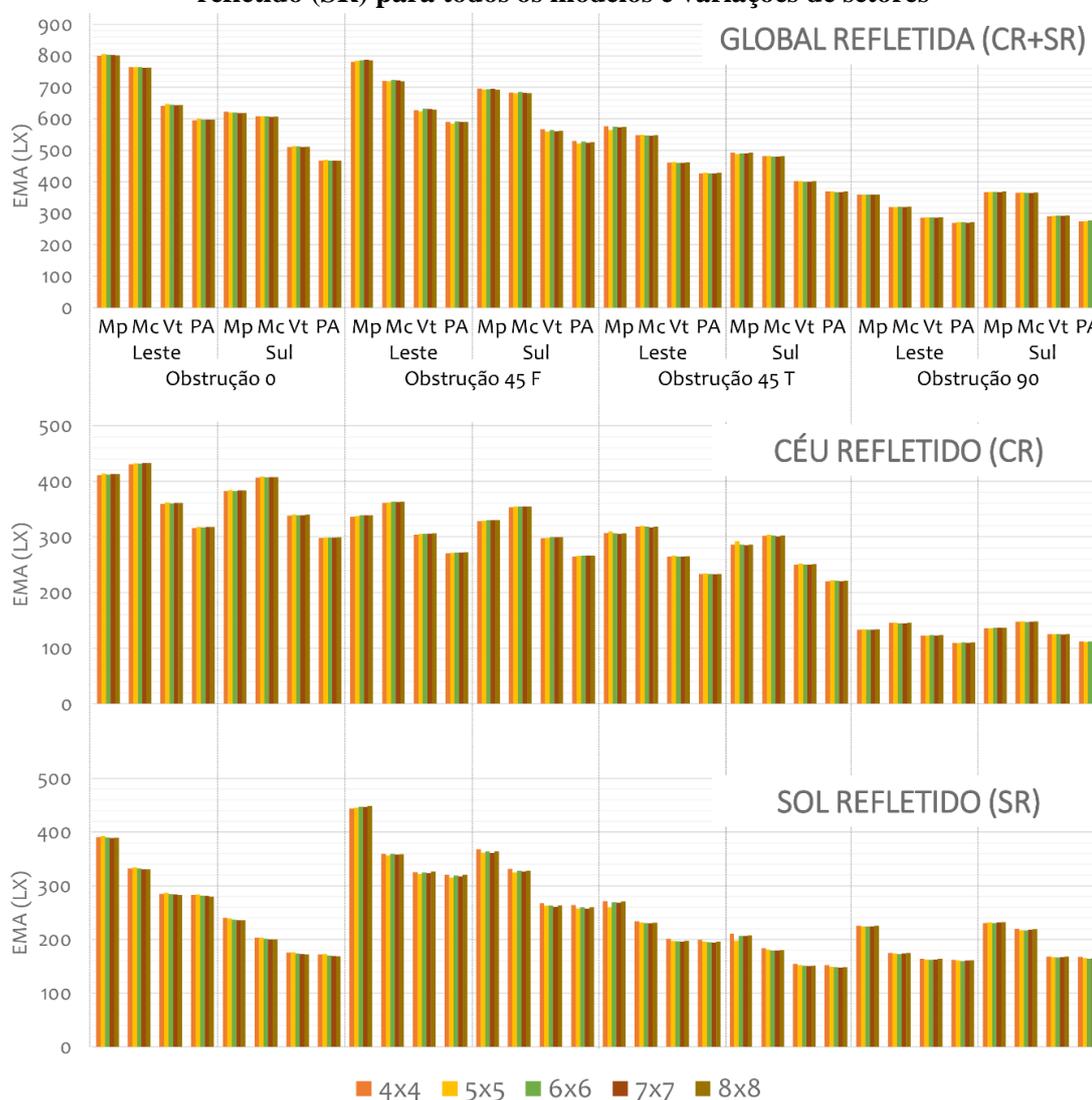
O estudo detalhado sobre o comportamento da malha de pontos dentro da setorização e sua distribuição espacial será apresentado posteriormente, entretanto, faz-se necessário identificar alguns comportamentos nos dados apresentados. Inicialmente observa-se que em alguns casos a diferença na quantidade de pontos para as setorizações chega a até 3 vezes, como no caso do modelo "0-L-Mc". Nos modelos com obstrução de frente (45F) e janela orientada a leste a quantidade de pontos atinge valores altos, passando de 500 no plano de trabalho.

Conclui-se que a penetração da luz solar direta é o fator determinante na definição da setorização para a componente direta. Em ambientes com maior penetração, como no caso daqueles orientados a leste a setorização indicada é a que possui densidade de 1,0 setor por m^2 , enquanto que para a orientação sul a setorização indicada é a de densidade de 0.4 set/ m^2 . A definição da quantidade de pontos dentro dos setores se relacionará a quantidade total de pontos e será apresentada posteriormente.

5.2.2.2 Setorização do plano de trabalho - Malha refletida

O critério utilizado na escolha dos valores de setorização para a componente refletida se baseará naqueles apresentados anteriormente, onde foi utilizada a MSmin citada no começo das análises. A partir dela foram calculados os valores de EMA refletida e suas componentes de sol e céu, cujos resultados numéricos são apresentados na Figura 61.

Figura 61 - EMA global refletida (CR+SR) e suas componentes céu refletido (CR) e sol refletido (SR) para todos os modelos e variações de setores



Fonte: Elaborada pelo autor

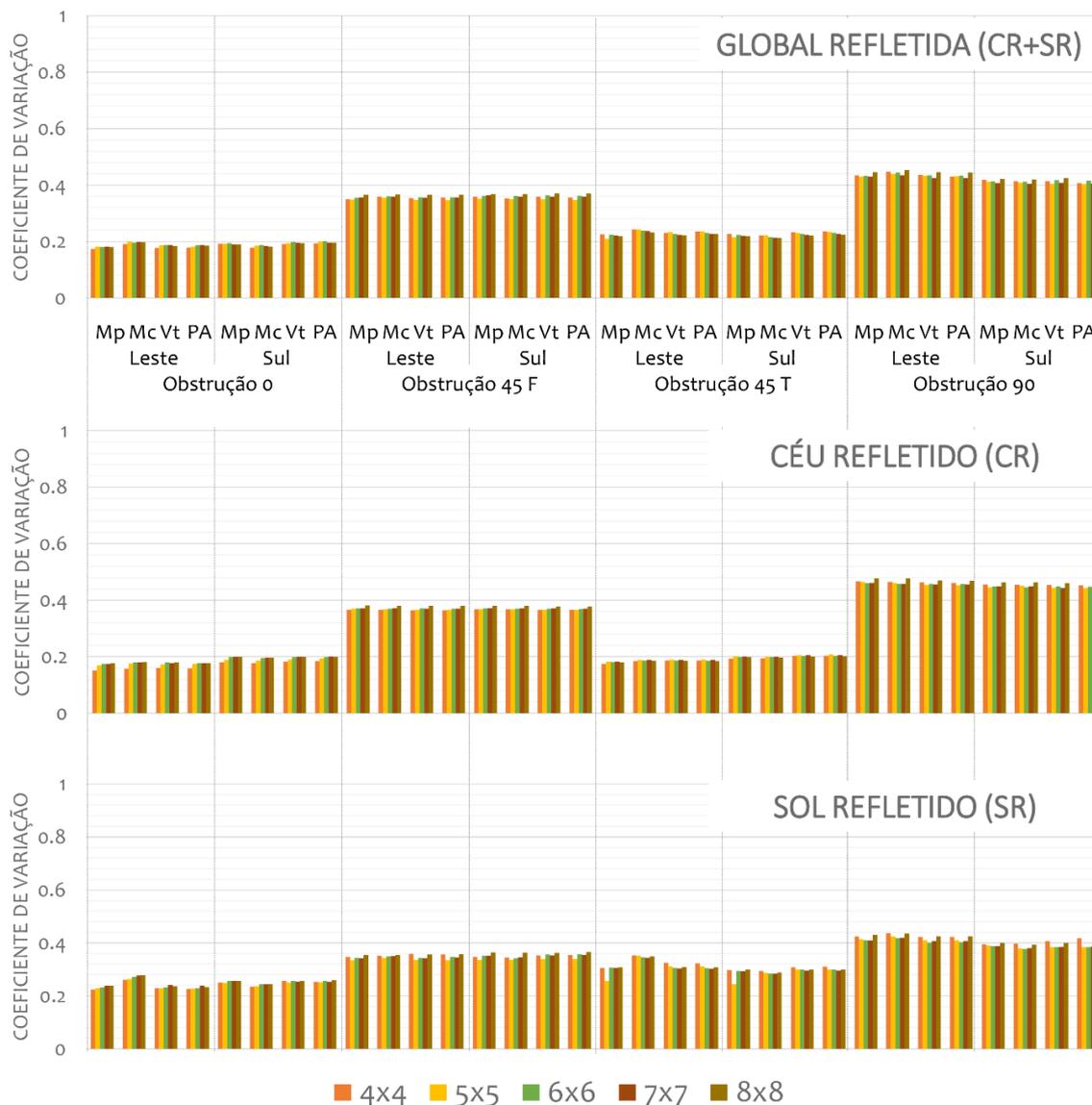
Observa-se, como acontece na componente direta, que as variáveis de latitude, orientação da abertura e obstrução externa influem no valor da iluminância, como já era esperado, entretanto, elas não afetaram o comportamento frente à setorização. O comportamento é semelhante se verificados os valores de EMA, que, em sua maioria, permanecem estáveis mesmo com setorizações diferentes.

Tal resultado corrobora que na situação de MSmin a setorização possui pouca influência no resultado final, entretanto, a análise da quantidade de pontos em cada setorização é necessária a fim de definir melhor o comportamento observado. Em contrapartida, a diferente quantidade de pontos para cada setorização indica que ela influencia o comportamento dos resultados e que a escolha adequada da distribuição dos pontos no plano de trabalho se relaciona com a estabilização da EMA.

O valor da iluminância média anual possui a limitação de não permitir que sejam verificadas as variações dentro do conjunto de setores, para tanto foi calculado o CV dos valores de cada setor, para cada combinação de setorização. Esse foi utilizado apenas, como dito anteriormente, para fins de comparação e não como valor absoluto. Os resultados são apresentados na Figura 62.

Os resultados de CV para a componente refletida indicam pouca variação entre setorizações e entre orientações. Todos os resultados se agrupam de forma semelhante por obstrução de entorno e apresentam valores inferiores àqueles encontrados para a malha da componente direta. Tais análises apontam novamente que o método de definição da MSmin conseguiu identificar corretamente, para cada setorização, a quantidade de pontos dentro do setor necessária para a caracterização do comportamento da iluminância em cada situação.

Figura 62 – Coeficiente de Variação da Iluminância global refletida (CR+CR) e suas componentes céu refletido (CR) e sol refletido (SR) para todos os modelos e variações de setores



Fonte: Elaborada pelo autor

Numa segunda etapa foram realizadas análises estatísticas a fim de verificar se os valores obtidos para diferentes setorizações, e apresentados anteriormente, podem ser considerados iguais. Inicialmente foi calculado o coeficiente de variação entre as médias de cada situação de setorização, tanto para a componente refletida da iluminância quanto para o desvio padrão. Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Coeficientes de variação para as diferentes setorizações, calculados a partir dos dados de iluminância e desvio padrão para a iluminância refletida e suas componentes

			CR+SR		CR		SR	
			E	DP	E	DP	E	DP
0	L	Mp	0,2%	1,9%	0,3%	6,1%	0,4%	2,6%
		Mc	0,1%	1,6%	0,2%	5,5%	0,5%	2,8%
		Vt	0,4%	2,4%	0,3%	4,8%	0,6%	2,2%
		PA	0,3%	2,1%	0,2%	4,7%	0,6%	2,2%
	S	Mp	0,3%	0,9%	0,2%	4,8%	0,8%	1,4%
		Mc	0,2%	1,9%	0,2%	4,4%	0,9%	2,0%
		Vt	0,2%	1,4%	0,2%	3,8%	1,0%	1,2%
		PA	0,2%	1,4%	0,2%	3,4%	1,1%	1,2%
45F	L	Mp	0,3%	1,9%	0,3%	1,6%	0,5%	2,1%
		Mc	0,2%	1,2%	0,2%	1,4%	0,3%	1,2%
		Vt	0,5%	1,8%	0,3%	1,5%	0,5%	2,8%
		PA	0,4%	1,9%	0,2%	1,6%	0,7%	2,7%
	S	Mp	0,2%	1,6%	0,2%	1,5%	0,7%	2,8%
		Mc	0,2%	1,9%	0,2%	1,3%	0,8%	2,9%
		Vt	0,4%	2,1%	0,3%	1,4%	1,0%	2,3%
		PA	0,6%	2,4%	0,3%	1,4%	1,0%	2,5%
45T	L	Mp	0,8%	2,7%	0,6%	1,6%	1,8%	7,4%
		Mc	0,2%	1,8%	0,3%	1,1%	0,7%	1,1%
		Vt	0,2%	2,1%	0,2%	1,1%	1,0%	2,7%
		PA	0,3%	2,0%	0,2%	1,1%	1,0%	2,7%
	S	Mp	0,3%	2,0%	1,0%	1,6%	2,3%	8,2%
		Mc	0,2%	2,0%	0,4%	1,0%	1,0%	1,5%
		Vt	0,3%	2,1%	0,3%	1,1%	1,0%	1,6%
		PA	0,3%	2,1%	0,3%	1,2%	1,1%	2,0%
90	L	Mp	0,1%	1,5%	0,3%	1,4%	0,3%	2,1%
		Mc	0,2%	1,6%	0,2%	1,6%	0,5%	2,2%
		Vt	0,2%	1,7%	0,2%	1,3%	0,6%	2,5%
		PA	0,4%	1,7%	0,2%	1,3%	0,6%	2,5%
	S	Mp	0,2%	1,4%	0,2%	1,4%	0,3%	1,3%
		Mc	0,2%	1,4%	0,3%	1,6%	0,6%	2,4%
		Vt	0,4%	2,0%	0,3%	1,5%	0,5%	2,8%
		PA	0,6%	2,1%	0,2%	1,5%	0,8%	3,7%

<5%
 5 a 10%
 10 a 20%
 20 a 30%
 >40%

Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores dos coeficientes de variação obtidos apresentam-se baixos, em sua maioria inferiores à 5%. Apenas em algumas situações específicas os valores ultrapassam os 5%, mas apenas em duas das latitudes simuladas. Esse resultado corrobora com o fato de que a definição da MSmin permitiu a correta caracterização da iluminância para todas as setorizações.

Para validar as inferências anteriores, como nos resultados apresentados anteriormente, foram realizados testes de ANOVA nas setorizações. Os resultados de ambos os testes não serão apresentados, pois todos eles indicam valores de $p > 0.05$ no teste, indicando que as medias são todas iguais estatisticamente, independente da setorização, o que resultou em um teste de Tukey com agrupamentos iguais para todas as setorizações, o que já era esperado em vista dos resultados dos testes de ANOVA.

Para a definição da setorização foi utilizado o mesmo critério de quantidade de pontos total no plano de trabalho utilizado para o coeficiente direto. As setorizações com menos pontos, bem como a quantidade de set/m² para todos os modelos, é apresentada na Tabela 13.

Para a maioria das situações a setorização que resulta em menos pontos é a com 4x4 setores. Observa-se que a setorização tende a aumentar com a redução da visão de céu, passando para 5x5, mas sem ultrapassar tal valor. As densidades de setores variam entre 0,4 e 0,7 set/m², indicando valores bem menores que os observados para a componente direta.

Para melhor definição da setorização é apresentada a quantidade de pontos total, na MSmin. Observa-se que nos modelos onde a setorização com menor quantidade de pontos no plano de trabalho é a de 4x4 a diferença percentual entre a setorização de 5x5 é alta, com valores chegando a quase o dobro de pontos. Nos modelos onde a setorização indicada como ideal é aquela de 5x5 a diferença entre a sua quantidade de pontos e a de setorização imediatamente inferior é bem menor, com valores menores que 20%. Isso aponta que em tais modelos as setorizações de 4x4 e 5x5 possuem quantidades de pontos semelhantes entre si, permitindo que uma ou outra se adequem à seleção da setorização ideal. Tal conclusão é corroborada pelo fato das séries de médias de iluminância analisadas pelos testes de ANOVA e Tukey apresentarem agrupamentos iguais para todos os modelos, quando comparadas as setorizações de 4x4 e 5x5.

Tais inferências permitem apontar que a setorização de 4x4, que corresponde a uma densidade de setores de 0,4 set/m² permite a correta definição da iluminância e das suas componentes analisadas com uma menor quantidade de pontos, na maioria dos casos, se comparadas às demais.

Tabela 13 - Setorização ideal para cada modelo estudado e cada componente, calculada a partir da quantidade de pontos

			Setorização			Pontos (CD+SD)		Indicada	
			CD+SD	CD	SD	4x4	5x5	Setores	(set/m ²)
0	L	Mp	4x4	4x4	4x4	34	68	4x4	0,4
		Mc	4x4	4x4	4x4	31	63	4x4	0,4
		Vt	4x4	4x4	4x4	19	42	4x4	0,4
		PA	4x4	4x4	4x4	19	39	4x4	0,4
	S	Mp	4x4	4x4	4x4	28	53	4x4	0,4
		Mc	4x4	4x4	4x4	25	45	4x4	0,4
		Vt	4x4	4x4	4x4	19	39	4x4	0,4
		PA	4x4	4x4	4x4	19	39	4x4	0,4
45F	L	Mp	4x4	4x4	4x4	88	141	4x4	0,4
		Mc	4x4	4x4	4x4	75	113	4x4	0,4
		Vt	4x4	4x4	4x4	72	102	4x4	0,4
		PA	4x4	4x4	4x4	55	99	4x4	0,4
	S	Mp	4x4	4x4	4x4	61	124	4x4	0,4
		Mc	4x4	4x4	4x4	70	116	4x4	0,4
		Vt	4x4	4x4	4x4	58	96	4x4	0,4
		PA	4x4	4x4	4x4	55	93	4x4	0,4
45T	L	Mp	4x4	4x4	4x4	88	99	4x4	0,4
		Mc	5x5	5x5	5x5	82	96	5x5	0,7
		Vt	5x5	5x5	5x5	79	90	5x5	0,7
		PA	5x5	5x5	5x5	76	87	5x5	0,7
	S	Mp	4x4	4x4	4x4	79	93	4x4	0,4
		Mc	5x5	5x5	5x5	79	93	5x5	0,7
		Vt	5x5	5x5	5x5	69	87	5x5	0,7
		PA	5x5	5x5	5x5	69	84	5x5	0,7
90	L	Mp	5x5	5x5	5x5	82	106	5x5	0,7
		Mc	5x5	5x5	5x5	76	108	5x5	0,7
		Vt	5x5	5x5	5x5	69	90	5x5	0,7
		PA	5x5	5x5	5x5	62	87	5x5	0,4
	S	Mp	5x5	5x5	5x5	69	87	5x5	0,4
		Mc	4x4	4x4	4x4	69	77	5x5	0,4
		Vt	5x5	5x5	5x5	55	77	5x5	0,4
		PA	5x5	5x5	5x5	48	77	5x5	0,4

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível sintetizar os resultados para a setorização direta e refletida a fim de seguir para a etapa de estudo da densidade de pontos. Para a setorização da componente direta os resultados apresentados apontam para uma malha de 1,0 set/m², já para a refletida a malha é de 0,4 set/m².

A análise global das setorizações permite perceber que não é necessária a divisão do plano de trabalho em muitos setores para que o comportamento da iluminância possa ser corretamente avaliado. Em todos os casos observa-se que setorizações menores permitem melhor definição da iluminância com menos pontos.

Importante notar que a análise exploratória aponta a ocorrência de eventos locais que alteram a quantidade de pontos necessários dentro do setor. Para a componente refletida os setores mais próximos às paredes tendem, em algumas situações, a apresentarem comportamentos distintos daqueles mais próximos ao centro do plano de trabalho. Tal comportamento é menos observado no cálculo da componente direta, em que os setores com mais pontos, na maioria das situações são aqueles próximos às aberturas.

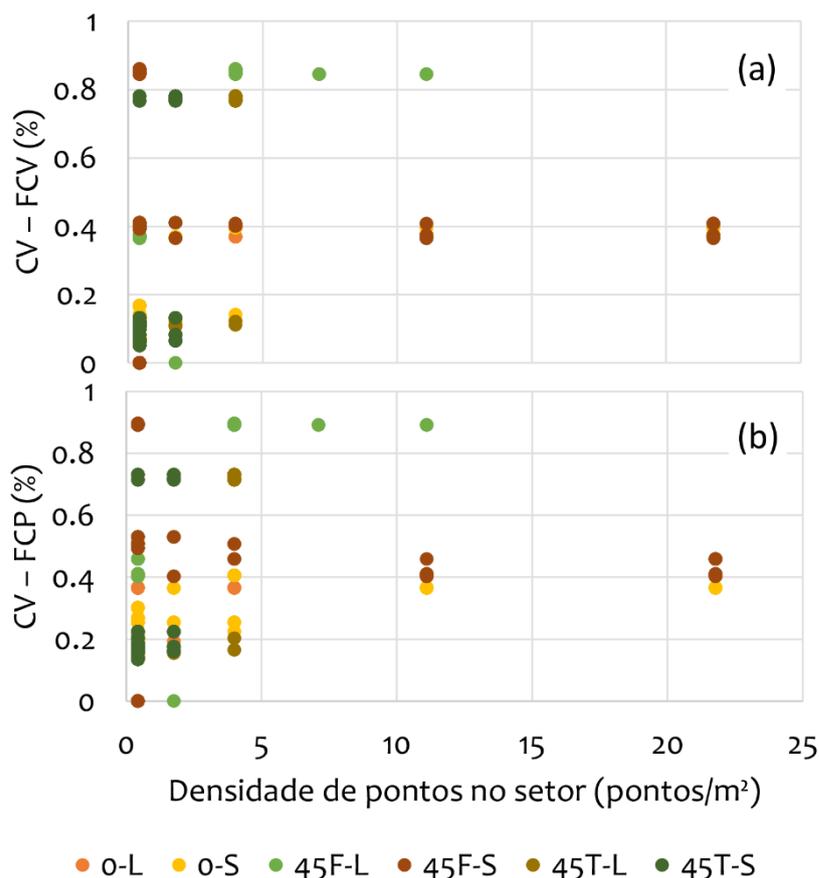
Observa-se que a obstrução de entorno, nos modelos estudados, não influenciou na setorização, nem a latitude de processamento. O parâmetro que influenciou nos resultados de forma direta, principalmente na setorização para a componente direta, foi a orientação da abertura. Em tais casos ambientes com janelas orientadas a leste, onde há maior penetração da luz solar de forma direta, as setorizações são maiores que aquelas com janelas orientadas a sul. Para fins de generalização é possível dizer que ambas as setorizações (4x4 e 6x6) permitem o cálculo da iluminância direta de forma eficiente.

5.2.2.3 Densidade de pontos por setor - Malha direta

A análise da quantidade de pontos por setor será dividida em duas etapas, para cada uma das malhas, direta e refletida. Para essa etapa são analisados apenas os dados referentes às setorizações identificadas anteriormente como as indicadas para o melhor desempenho dos resultados. Para a malha da componente direta será analisada a setorização de 6x6, correspondente à densidade de 1,0 set/m², e para a componente refletida a setorização de 4x4, correspondente à densidade de 0,4 set/m².

Para a componente direta foram propostos dois parâmetros de referência para a definição da quantidade de pontos dentro do setor, o Fator de Visão de Céu (FVC) e o Fator de Céu Ponderado (FCP). Essa quantidade de pontos, para facilitar o cruzamento dos parâmetros foi convertida em densidade de pontos (pt/m²). Os resultados da comparação entre os parâmetros analisados são apresentados na Figura 63. Como observado na fase exploratória a latitude, para o intervalo estudado, não foi um fator importante no comportamento dos resultados e os dados foram agrupados, entretanto, a orientação e a obstrução de entorno foram destacadas para melhor compreensão dos resultados.

Figura 63 - Gráfico de dispersão do FVC (a) e FCP (b) versus densidade de pontos no setor para a componente direta da iluminância.



Fonte: Elaborada pelo autor

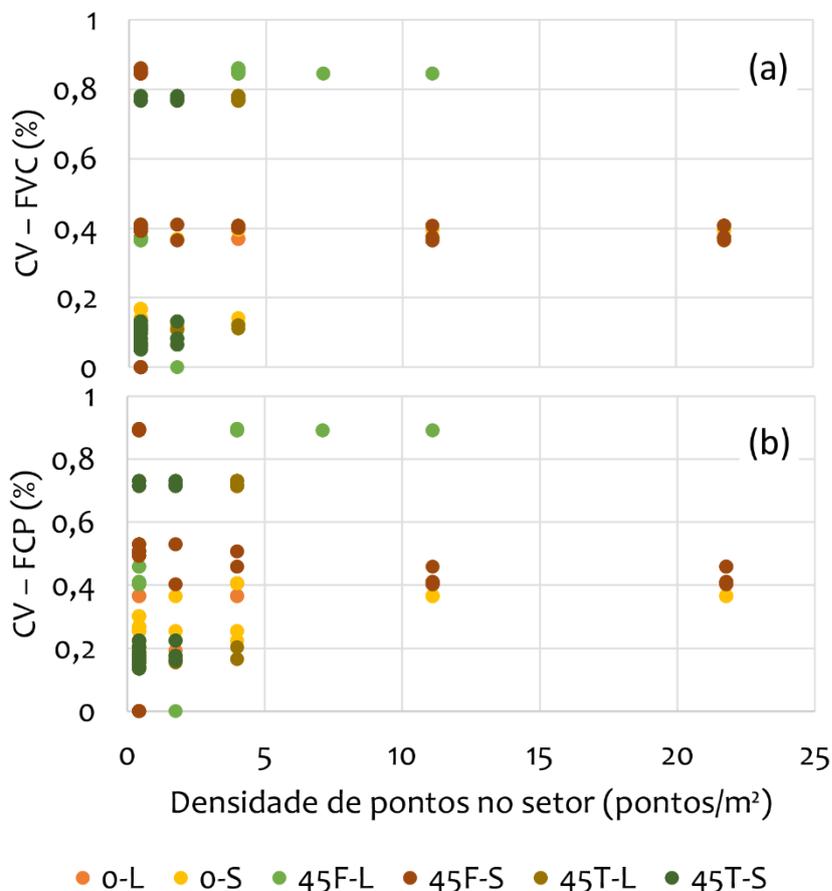
A análise dos resultados não indica uma relação entre as variáveis estudadas, resultando em uma dispersão de pontos em que não é possível identificar algum comportamento equacionável. É possível observar, entretanto, que a maioria dos pontos tende a ficar na região com densidade de até 5,0 pt/m², independente dos valores de FVC e FCP. O gráfico permite verificar ainda que o FCP conseguiu agrupar melhor os resultados da região citada anteriormente em valores mais próximos, esse comportamento mais uma vez indica o FCP como um parâmetro com potencial melhor que o FVC.

Os pontos que se encontram fora da região de maior densidade do gráfico são, em sua maioria, dos modelos com janela orientada a sul e obstrução de entorno de 0 e 45F, que são aqueles com maior entrada de luz e conseqüentemente maiores valores de iluminância no plano de trabalho. Isso indica que os modelos com menor visão de céu são aqueles que necessitam de menos pontos de simulação para a estabilização dos resultados.

Na análise exploratória foi observado que não somente os valores de FCP e FVC médio do setor poderiam ser parâmetros definidores da quantidade de pontos, mas também a variação

desses dentro do setor. Como não foi possível identificar comportamento predominante utilizando o valor médio foi calculado o Coeficiente de Variação (CV) deles dentro do setor, cujas relações com a densidade de pontos são apresentadas na Figura 64.

Figura 64 - Gráfico de dispersão do Coeficiente de Variação de FVC (a) e FCP (b) versus densidade de pontos no setor para a componente direta da iluminância



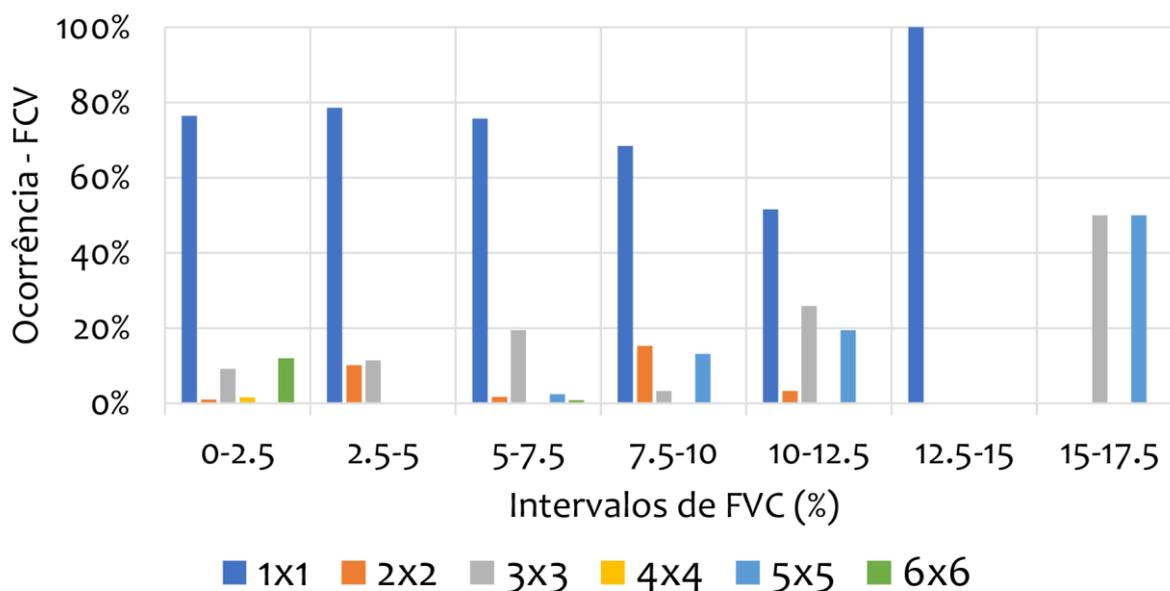
Mesmo analisando a variação dentro do setor não é possível identificar relação direta entre as variáveis estudadas. O gráfico de dispersão para o CV dos parâmetros de FVC e FCP apresentaram mesmo comportamento que o do valor absoluto, com muitos pontos na região onde a densidade é menor que 5,0 pt/m². Os pontos que fogem ao agrupamento descrito são aqueles correspondentes aos modelos com obstrução de entorno do tipo 0 e 45F e com janela orientada a sul.

Diante de tais resultados é possível determinar que, para o conjunto de modelos e parâmetros analisados, não há uma relação direta entre a densidade de pontos no setor e o FCP ou o FVC. Na análise exploratória percebe-se que os setores mais próximos a abertura, ou aqueles que possuem maior variação da visão de céu, necessitam de mais pontos para estabilização dos resultados, o que indica dever haver um valor de FVC ou FCP em que o setor

passa a necessitar de mais de um ponto. Tendo em vista os resultados anteriores será utilizado como valor de referência o FVC por permitir cálculo mais direto e mais comum nos softwares de simulação em iluminação natural, como mostrado na seção 2.4.1.

Na Figura 65 são apresentados os resultados de forma diferente da anterior. Foram computadas as ocorrências das malhas dentro do setor para cada intervalo de FVC, com um passo de 2,5%, de forma a englobar todo o intervalo de resultados. A figura apresenta a ocorrência com valores relativos ao total por intervalo. Foi escolhida a malha e não a densidade, como nas análises anteriores, para facilitar a apresentação e compreensão dos resultados, entretanto, para a conclusão dos resultados elas serão tratadas como densidade de pontos.

Figura 65 - Gráfico da ocorrência de malhas da componente direta nos setores versus FVC.



Fonte: Elaborada pelo autor

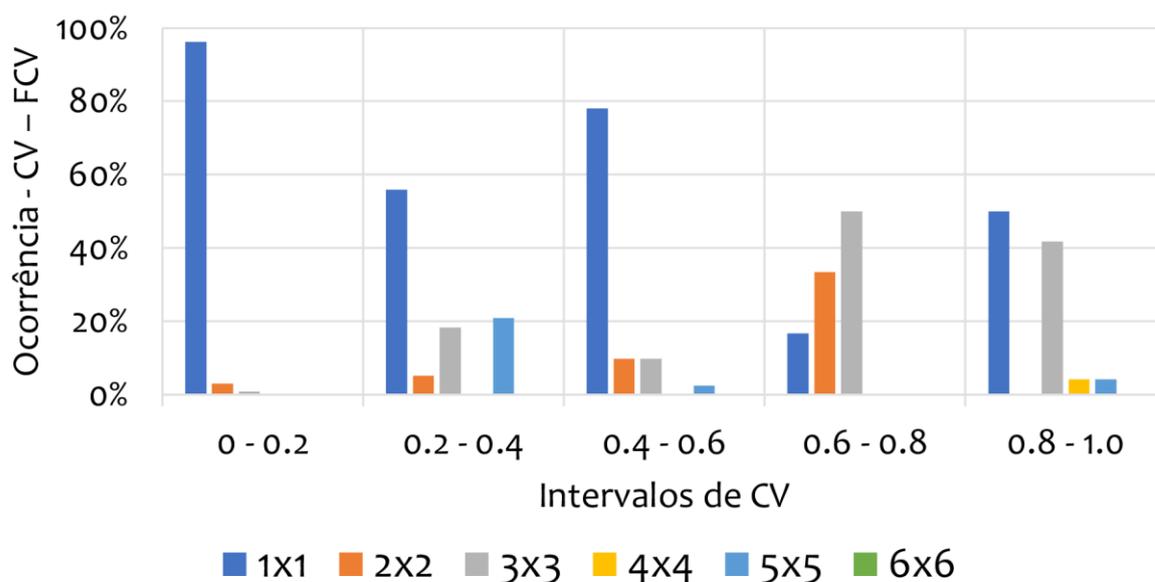
Observa-se que a ocorrência de setores com apenas um ponto é predominante para valores de FVC menores que 15%. Esse comportamento, se analisados os valores absolutos, compreendem mais de 70% dos setores estudados e indica que na maioria dos casos faz-se necessário apenas um ponto por setor. Para valores de FVC maiores que o indicado as malhas setoriais de 3x3 e 5x5 pontos são predominantes, indicando necessidade de mais pontos para estabilização dos resultados.

É importante destacar duas questões: A adoção de malha setorial de 3x3 pontos para valores de FVC maiores que 15%, atende às situações de FVC. Outra verificação importante é que o parâmetro de FVC carrega consigo uma limitação de aplicação. Em situações de janelas zenitais, onde a visão de céu é maior, a adoção de tal parâmetro como definidor da densidade

de pontos no setor pode trazer incoerências e valores excessivos de pontos, para tanto foi proposta outra abordagem.

A fim de definir um valor que pudesse ser generalizado para outros tipos de abertura que não a lateral foi estudado o coeficiente de variação de FVC (CV-FVC) dentro dos setores, cujos resultados, divididos por faixas, é apresentado na Figura 66. Observa-se que o valor de CV-FVC 0,6 se apresenta como divisor entre os comportamentos de setores com apenas um ponto e setores com malha setorial de 3x3 o que se mostra positivo em vista da generalização dos resultados.

Figura 66 - Gráfico da ocorrência de malhas nos setores versus coeficiente de variação de FVC.



Fonte: Elaborada pelo autor

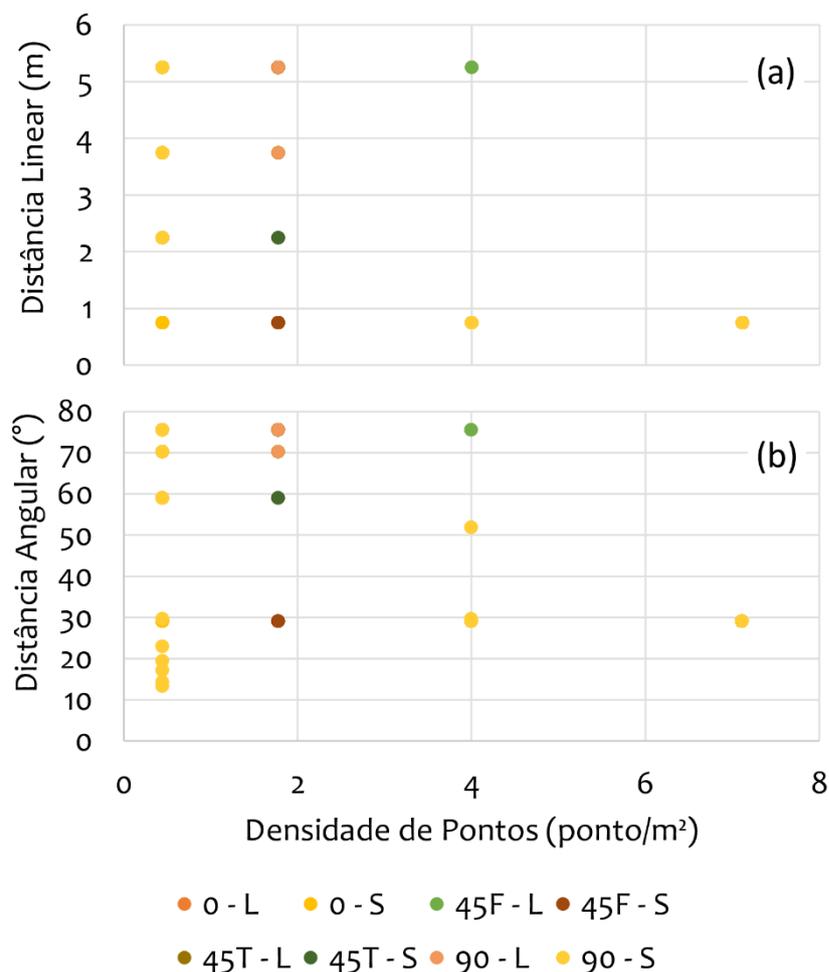
A compreensão do comportamento das malhas dentro do setor a partir dos dados apresentados permite definir um valor de FCP/FVC em que se faz necessário mais de um ponto por setor para a estabilização dos resultados. Neste caso, levando em consideração as análises realizadas, recomenda-se a utilização de uma malha de 3x3 pontos no setor, o que corresponde a uma densidade de 9,0 pt/m² para setores com valor de CV para FCP ou FVC maior que 0,6.

5.2.2.4 Densidade de pontos por setor - Malha refletida

Utilizando a mesma sequência de análises da componente direta foi verificado o comportamento dos resultados para a componente refletida. Inicialmente foi gerado um gráfico de dispersão para os dois parâmetros propostos como referenciais para o comportamento das malhas, a distância linear à janela (D_L) e a distância angular (D_A), apresentado na Figura 67.

Os resultados, como no estudo anterior, não permitem identificar comportamento predominante nem uma relação direta entre as variáveis. O fato dos pontos se agruparem em determinadas posições do gráfico, estando vários pontos sobrepostos, faz com que a análise utilizando tal ferramenta fique comprometida, ademais a utilização da D_L ou da D_A não apresentou diferença efetiva na análise.

Figura 67 - Gráfico de dispersão de Distância Linear (D_L) (a) e Distância Angular (D_A) (b) versus densidade de pontos por setor para a componente refletida da iluminância



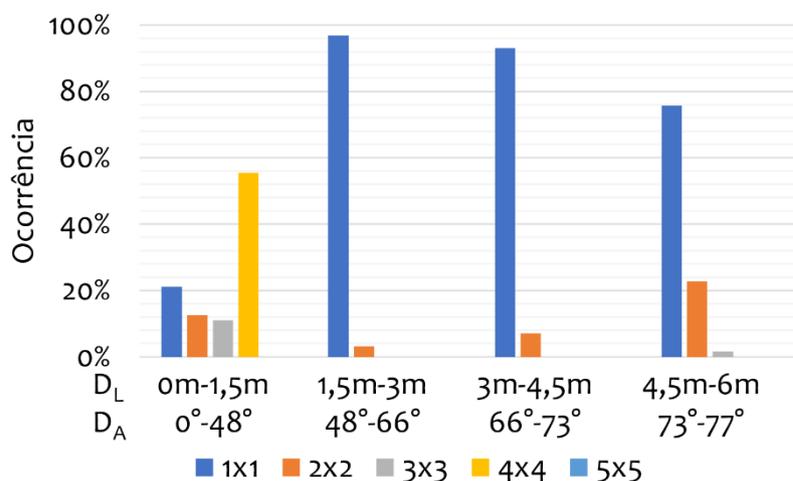
Fonte: Elaborada pelo autor

Para a melhor compreensão dos resultados outras duas verificações foram feitas. Como observado na fase exploratória dois fatores foram evidenciados no comportamento dos setores frente à variação da malha, a distância à abertura e a distância às paredes. Observou-se que os setores mais próximos à abertura ou à parede foram aqueles que necessitaram de mais de um ponto por setor para estabilização dos resultados.

Na Figura 68 são apresentados os resultados para a ocorrência de malhas nos setores, para a setorização de 4x4. Os resultados foram agrupados em conjuntos de setores iniciando

dos quatro mais próximos à abertura até os mais distantes, relacionando-se com os intervalos de D_L e D_A . É possível observar que o grupo de setores da linha 1, correspondendo aos mais próximos a abertura, possuem ocorrência de malhas com 4x4 pontos dentro do setor superior a com apenas um ponto. Para as demais linhas até o fundo do ambiente é possível verificar que todos os setores possuem maior ocorrência de malhas de apenas um ponto.

Figura 68 - Gráfico da ocorrência de malhas nos conjuntos de setores para a componente refletida da iluminância

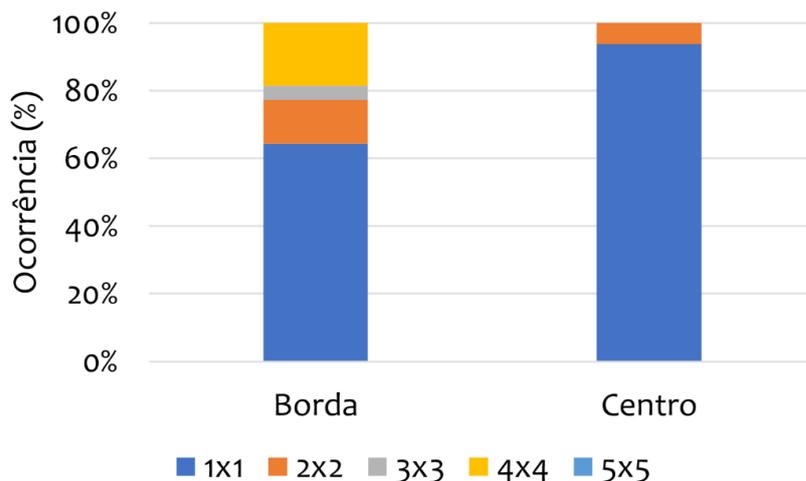


Fonte: Elaborada pelo autor

No gráfico são apresentados os valores de máximo e mínimo de D_L e D_A para cada conjunto de setores. A primeira linha, cujo intervalo de D_L é de 0 a 1,5m, possui D_L médio de 0,75m e D_A médio de 30°. Para o estudo e os modelos utilizados é possível afirmar que esses valores médios podem ser tomados como parâmetros no momento da decisão quanto à densidade de pontos dentro do setor.

Outra questão observada é quanto à proximidade com as paredes, cuja análise exploratória apontou relação com a densidade de pontos dentro do setor. Para tanto foi analisada a ocorrência das malhas estudadas nos setores da borda e do centro do plano de trabalho, cujos resultados são mostrados na Figura 69.

Figura 69 - Gráfico da ocorrência percentual de malhas nos conjuntos de setores na borda e no centro do plano de trabalho para a componente refletida da iluminância



Fonte: Elaborada pelo autor

É possível observar que para os setores no centro do plano de trabalho a ocorrência de setores com mais de um ponto é muito pequena, inferior a 10%, enquanto que nos setores das bordas esse valor chega a 36%. Percebe-se ainda que predomina, em todos os setores, as malhas com apenas um ponto, sendo exclusivamente na linha de setores próximos à janela que esse comportamento é alterado.

A escolha do parâmetro de análise ideal para a definição da densidade de pontos dentro do setor deve levar em consideração a possibilidade de generalização dos resultados obtidos. A utilização da distância linear à abertura não permite que mudanças de tamanho ou de altura da abertura influenciem na definição dos pontos de malha. Nesse sentido a escolha da distância angular como parâmetro definidor da densidade de pontos por setor tende a ser a mais indicada por permitir computar tais alterações.

5.3 Conclusão

A etapa de análise final apresentada neste capítulo mostrou-se extensa tendo em vista o grande volume de dados obtidos e a quantidade de simulações utilizadas. Alguns parâmetros de processamento previstos inicialmente como importantes na definição da malha mostraram ter pouca importância, como no caso da latitude. Com relação a orientação observou-se que ela influencia nos resultados, principalmente como observado na etapa de análise exploratória, mas que se dilui quanto o conjunto de dados completo é analisado.

A utilização de uma malha de pontos que leva em conta a latitude, ou a orientação do modelo, se apresenta como um limitador tendo em vista a possibilidade de estudos comparativos utilizando a simulação computacional. Na fase exploratória da análise foi

possível identificar que o comportamento frente à setorização apresentou distinções, mas que de modo geral os setores mais próximos à abertura são aqueles que possuem maior sensibilidade ao aumento da malha setorial, principalmente para a componente direta.

Quando analisada a componente refletida outros elementos tornam-se mais importantes, como a distância às paredes. Setores de canto, principalmente pra setorizações maiores, tenderam a necessitar de mais pontos do que aqueles mais próximos do centro. Essa mesma análise foi feita no final da fase estatística, indicando que para a malha da componente refletida a distância às superfícies pode ser um parâmetro definidor da densidade de pontos dentro dos setores.

A análise estatística, se seguiu à exploratória, permitiu a definição da setorização e da densidade de pontos por setor de forma precisa. É importante destacar que na primeira etapa dos estudos da tese foram utilizados os testes de ANOVA e Tukey sem tratamento de valores espúrios, entretanto, na etapa final sua utilização permitiu melhor compreensão dos resultados. A ocorrência de valores de pico de iluminância dentro dos setores por vezes fez as análises do ponto de estabilidade no teste de Tukey serem inconclusivas ou preverem uma quantidade excessiva de pontos, o que inviabilizaria a proposta.

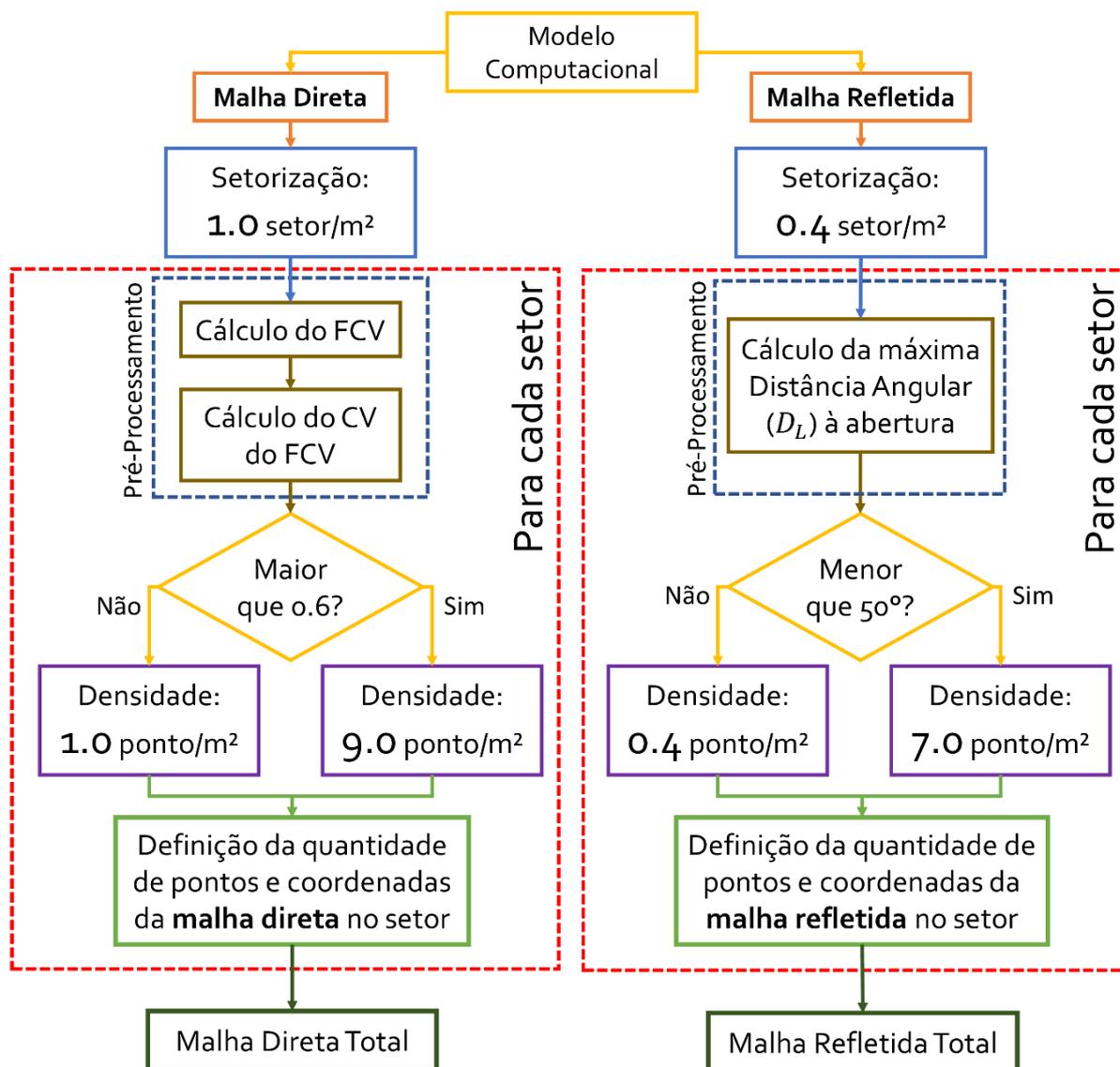
Também é importante destacar que as diferenças estatísticas entre as malhas setoriais identificadas pelo ANOVA devem ser mais estudadas, pois algumas diferenças são estatisticamente significativas, mas, para percepção humana são desprezíveis. Esse ajuste na sensibilidade do teste de ANOVA, bem como nas conclusões de estabilidade do teste de Tukey podem ser mais estudadas a fim de aplicar melhor tais testes à sensibilidade humana aos parâmetros de conforto ambiental.

Esperava-se que a análise estatística pudesse, com o estudo dos gráficos de dispersão dos dados, auxiliar na identificação de padrões de comportamentos que permitissem a interpolação de equações que relacionassem as variáveis propostas e a setorização ou a densidade de pontos, entretanto, isso não foi possível. Como metodologia auxiliar foi utilizada a análise de frequência da ocorrência das malhas e das setorizações, possibilitando a definição de valores limites.

Nesse sentido a análise estatística permitiu a definição de uma metodologia para o cálculo de malhas com diferentes densidades de setores e de pontos dentro dos setores que é apresentada na Figura 70. A definição da setorização pode encontrar alguns problemas em ambientes com medidas que indiquem quantidades não inteiras de setores, em tais casos, a adoção de densidade de setores maior ou menor implicará apenas em mais ou menos pontos,

entretanto, não sofrerá influência significativa na iluminância média dentro dos setores, como apontou as análises de quantidades de pontos da etapa estatística. Nesse sentido, deve-se optar pela setorização menor, a fim de obter menos setores, mas respeitando a densidade de pontos dentro do setor proposta.

Figura 70 - Fluxograma com as etapas de cálculo da malha de pontos proposta na tese



Fonte: Elaborada pelo autor

6 ESTUDO COMPARATIVO: APLICAÇÃO DA MALHA NÃO-UNIFORME

A partir dos resultados obtidos anteriormente foi realizada uma aplicação da metodologia proposta, a fim de verificar a efetividade do método desenvolvido.

6.1 Metodologia

A aplicação foi baseada em um modelo urbano real para a cidade de Maceió-AL. Foram utilizados como base para definição do modelo urbano do ambiente os parâmetros de largura da via, altura da edificação obstruidora, afastamentos laterais e frontais das edificações e altura do ambiente. A aplicação da metodologia proposta em um modelo de dimensões diferentes do estudado até então visa verificar a generalização do método proposto, que não deve se limitar apenas a ambientes com proporção 1:1.

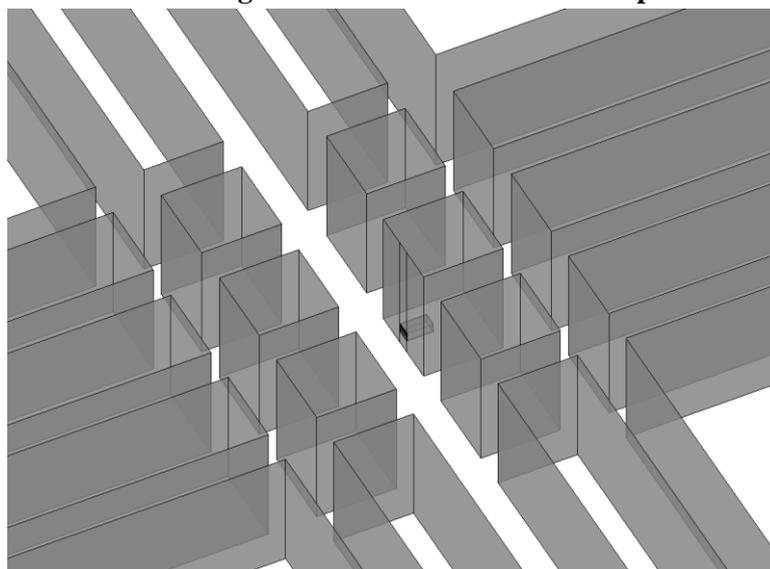
Para a definição de tais parâmetros faz-se necessário escolher a região da cidade, cuja escolhida foi a ZR-4 (Zona Residencial 4), que engloba os bairros de Ponta Verde, Pajuçara, Jatiúca e uma porção de Cruz das Almas. A escolha baseia-se no fato de que alguns deles já possuem alta densidade de edificações (BARBOSA, 2009), o que evidencia problemas relacionados com a disponibilidade de luz natural. Essas geometrias permitem ainda que sejam verificados os efeitos de cânion urbano, que influenciam diretamente na visão de céu dos pontos de estudo,

Os parâmetros urbanos utilizados na modelagem foram obtidos do Código de Urbanismo e Edificações da cidade de Maceió - Lei Municipal 5.593/07 (MACEIÓ, 2007) para a região escolhida e para edificações residenciais multifamiliares (UR-5). O mesmo normativo define que é permitido para a cidade de Maceió quatro dimensões de vias, com as respectivas definições de calçada e canteiros. Para o estudo foi escolhida a com largura de 12m, que engloba 8m de pista de rolamento e 2m de passeio em cada lado. A escolha se justifica por ser a mais estrita das possibilidades, agravando o efeito de redução da visão de céu.

A altura das edificações também foi definida com base no código de edificação de Maceió (MACEIÓ, 2007). Para edificações residenciais (UR-5) é permitida a construção de edifícios de até 15 pavimentos, entretanto, será estudada a situação intermediária, com 10 pavimentos. A escolha está embasada no estado atual de verticalização da região, onde predominam edifícios de 10 pavimentos.

Para a altura escolhida, adotando a formulação prevista código de edificação de Maceió (MACEIÓ, 2007), o afastamento frontal deverá ser de 7,0 m, os laterais e o posterior de 5,5 m. O modelo com a geometria urbana utilizada é apresentado na Figura 71. A quadra com os volumes das edificações compreende seis prédios, os demais volumes alongados, foram criados a fim de garantir a visão de céu em uma situação de consolidação homogênea.

Figura 71 - Modelo de geometria urbana utilizado nos processamentos

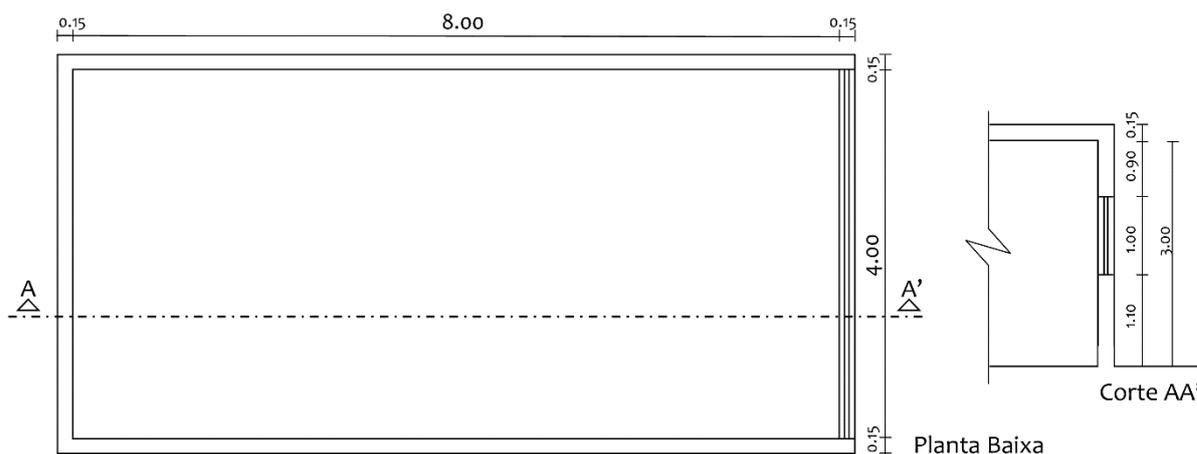


Fonte: Elaborada pelo autor

Para que sejam analisadas algumas situações de visão de céu são propostas três alturas de ambiente. A maioria das edificações localizadas na ZR-4 possuem um subsolo semienterrado e mais um pavimento com serviços comuns do condomínio, para só então iniciar o primeiro pavimento tipo. Nesse sentido, foram escolhidas três situações de nível de piso do ambiente de estudo, correspondentes a três modelos: a 4,5m do nível da rua (Modelo A), correspondente ao primeiro andar; a 16,5 m, correspondente ao quinto andar (Modelo B), e a 31.5m, correspondente ao último pavimento (Modelo C).

A escolha das dimensões do ambiente foi definida por ser tipologia dimensional recorrente na cidade e porque permite avaliar bem a influência da distância da abertura em estudos, como afirma Ciampini (2005). Foi definida uma relação de 1:2 entre largura e profundidade, sendo as dimensões apresentadas na Figura 72.

Figura 72 - Geometria do ambiente utilizado nos processamentos da etapa final



Fonte: Elaborada pelo autor

As características dos materiais das superfícies foram definidas a partir da tabela de refletância fornecida pelo TropLux, descritas na Tabela 14, com dados de Dornelles e Roriz (2007). Para as superfícies de entorno foi utilizado como valor de referência o proposto por Laranja (2010), apresentando um valor médio utilizado comumente nas edificações.

Tabela 14 - Refletância das superfícies utilizadas no modelo da etapa final

Superfície	Material	Refletância Difusa
Piso ¹	Concreto	0,40
Paredes ¹	Tinta Suvinil PVA Branco Neve	0,85
Teto ¹	Tinta Suvinil PVA Branco Neve	0,85
Entorno Construído ²	Diverso	0,40

Fonte: ¹DORNELLES e RORIZ, 2007; ²LARANJA (2010)

Tendo em vista que o estudo busca comparar a metodologia proposta de malha e as demais malhas previstas pelos normativos é que foram definidas as combinações que foram utilizadas. Inicialmente foi calculada a malha preconizada pela NBR 15215 (ABNT, 2005), em que é descrita a equação 5, apresentada na seção 2.3, dada por:

$$K = \frac{C \times L}{H_m \times (C + L)} \quad (5)$$

Onde:

L é a largura do ambiente, em metros;

C é o comprimento do ambiente, em metros;

H_m é a distância vertical, em metros, entre a superfície de trabalho e o topo da janela, em metros. Logo:

$$K = \frac{C \times L}{H_m \times (C + L)} = \frac{8 \times 4}{(3,00 - 0,75) \times (8 + 4)} = \frac{32}{27} = 1,18$$

Segundo a tabela fornecida pela norma, apresentada na Tabela 1, o número mínimo de pontos de cálculo para o ambiente deverá de 16 pontos espalhados por todo o plano de trabalho de forma uniforme.

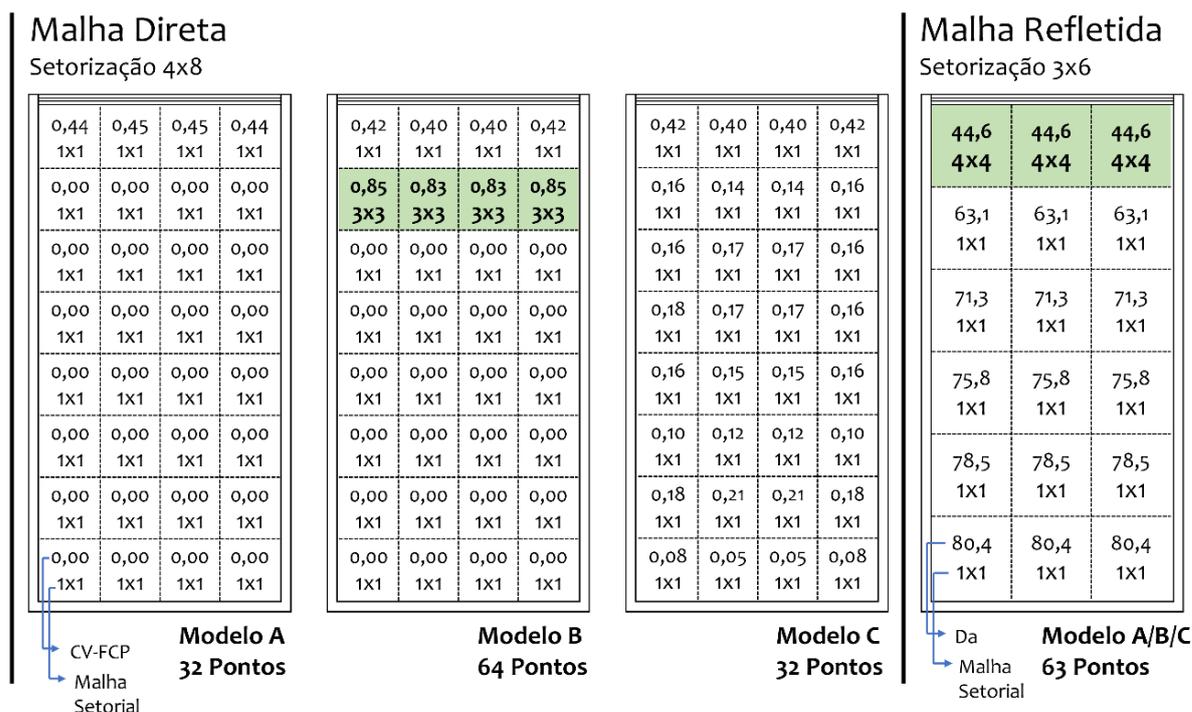
Foi prevista uma malha de 3x6, totalizando 18 pontos distribuídos uniformemente pelo plano de trabalho e atendendo ao requisito de norma. Posteriormente foi calculada a malha necessária pelo normativo da LM-83 (IES, 2012) que prevê as métricas de ASE e ALNe. Para tal normativo é indicada uma malha de, no máximo, 0,6 m de distância entre os pontos. Para o ambiente de estudo foi utilizada uma malha de 7x14 pontos.

Para definir a malha proposta na pesquisa faz-se necessário seguir o roteiro de cálculo para a malha proposta apresentado no item 5.3. Inicialmente deve-se definir a setorização para posteriormente calcular os coeficientes que definem a quantidade de pontos dentro dos setores.

Para o cálculo da componente direta o primeiro passo é a setorização, cuja proposta é de 1,0 set/m², o que resulta em uma setorização de 4x8. Posteriormente, na fase de pré-processamento, foi calculado o valor do CV para o FVC no setor. Importante destacar que o cálculo do CV requer que o valor de FVC seja calculado em mais de um ponto do ambiente, entretanto, a malha necessária para isso não foi objeto de estudo da pesquisa. Tendo em vista que a densidade máxima de pontos por setor prevista para a componente direta é de 9,0 pt/m², esta será utilizada na fase de pré-processamento para o cálculo do FVC. Vale destacar que softwares de simulação em iluminação natural que utilizam o método do *Ray Tracing*, como no caso do TropLux, que será utilizado também nesta fase, permitem que tal coeficiente seja calculado de forma muito rápida.

Os resultados obtidos para o CV do FVC, bem como a malha setorial utilizada e o total de pontos para cada modelo são apresentados na Figura 73. É importante destacar que para o modelo B, que está no quinto andar, a linha de setores mais próxima à janela não atinge valores de CV de FVC maiores que 0,6 para admitirem malha maior que um ponto.

Figura 73 - Malha da componente direta e da componente refletida para o estudo final

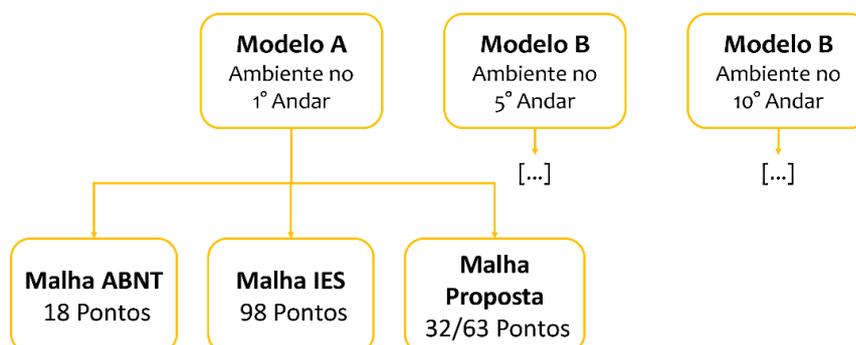


Fonte: Elaborada pelo autor

Também foi observado que os setores que atingem valores de CV-FVC maiores que 0,6 foram aqueles que possuem pontos com e sem visão de céu, fazendo com que o setor seja uma zona de transição entre essas duas situações. No caso do modelo A, a zona de transição está exatamente na divisão entre a primeira e segunda linha e setores, fazendo com que os valores de CV para FVC não fossem maiores que 0,6.

Para a malha da componente refletida, tendo em vista que essa leva em conta apenas a distância angular à janela, todos os modelos possuem mesma distribuição, e que é apresentada também na Figura 73. Os modelos foram simulados utilizando o software TropLux 8 e a síntese das combinações de processamento é apresentada na Figura 74. Para cada modelo serão processadas três malhas de pontos, calculadas anteriormente, totalizando nove simulações.

Figura 74 - Síntese dos processamentos da fase final



Fonte: Elaborada pelo autor

Os processamentos foram realizados utilizando os mesmos parâmetros de processamento das fases anteriores do estudo, das 8h às 18h (hora legal), no meio do intervalo, todos os dias do ano, totalizando 3.650 horas. Foi utilizado o Céu com Distribuição Dinâmica de Luminâncias (CDDL), para a cidade de Maceió-AL. Foram utilizadas as mesmas orientações do estudo inicial, a sul e leste. As orientações levam em consideração a trajetória solar aparente para a cidade de Maceió-AL e fazem com que o cânion urbano onde o ambiente está inserido também apresente situações distintas. A justificativa para a escolha das duas orientações é apresentada no início do trabalho, na seção 4.1.

Para a análise dos dados foram utilizadas algumas das métricas das fases anteriores do estudo, cuja síntese e os valores de referência são apresentados no Quadro 8. Importante destacar que, como na primeira etapa da tese, o valor de referência da ALNe foi alterado de 300lx, preconizado pela IES (2012), para 1.000lx. A alteração se justifica pela grande disponibilidade de luz natural para a região processada fazer com que os resultados fossem sempre de 100% impedindo a análise comparativa. Ressalta-se que o valor de ALNe com o parâmetro alterado não foi utilizado para fins de avaliação de desempenho do modelo de forma isolada, mas para comparação com os outros modelos e malhas de pontos analisadas, bem como todas as demais métricas. Para as outras métricas foram mantidos os parâmetros de referência previstos pelos normativos.

Quadro 8 - Métricas de avaliação do desempenho da Luz Natural utilizadas no estudo final

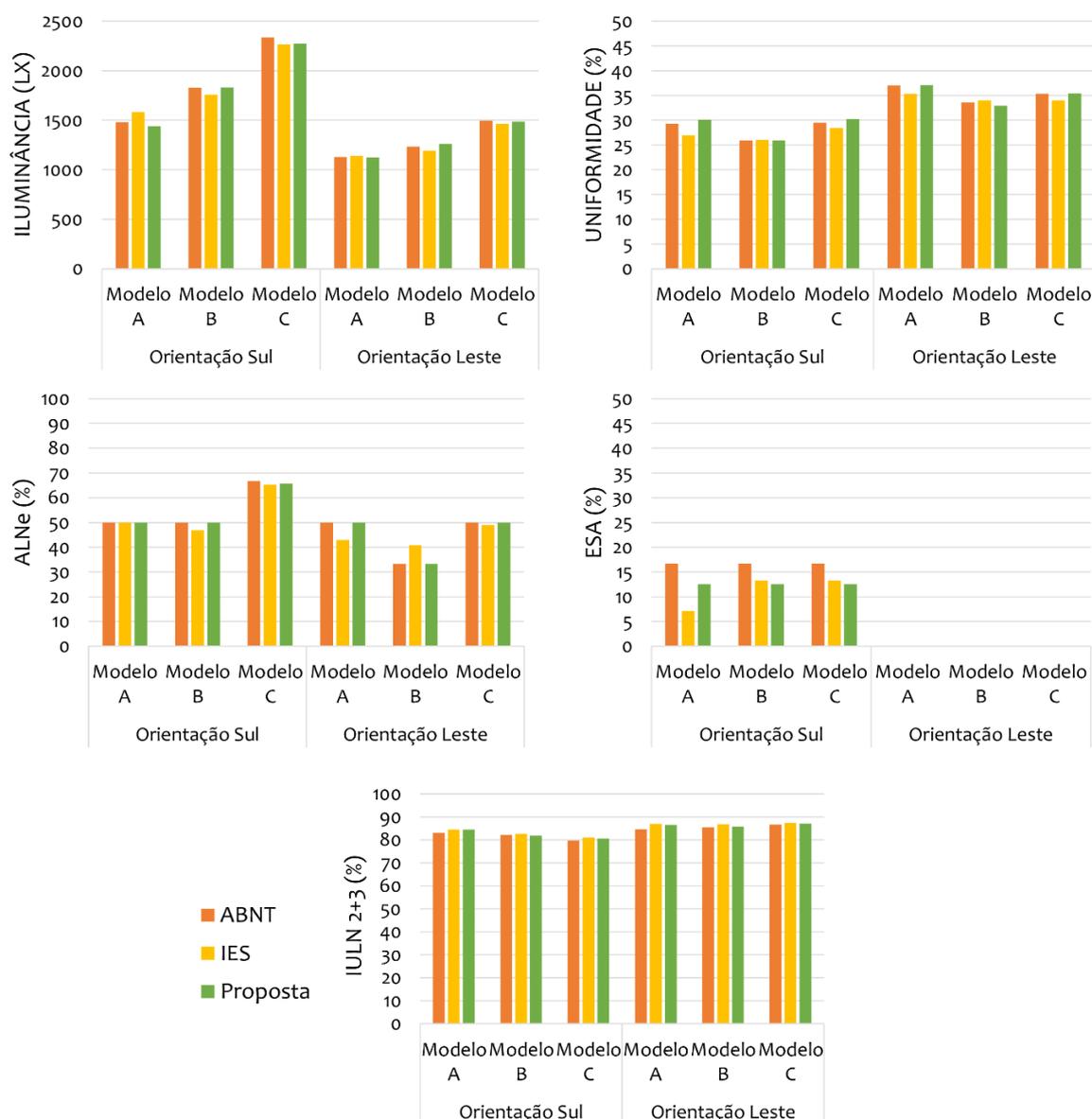
Índice	Sigla	Referência	Referenciais
Iluminância Média	EMA	(ANBT, 2005a, 2005b, 2013c)	-
Uniformidade (da Iluminância)	UMA	ABNT (2013b)	0,7 (70%)
Autonomia de Luz Natural	ALN	Reinhart e Walkenhorst (2001)	1.000 lx
Iluminância Útil de Luz Natural	IULN	Nabil e Mardaljevic (2006)	100 lx; 500 lx; 3.000 lx
Exposição Solar Anual	ESA	IES (2012)	1.000lx 250 h

Fonte: Elaborada pelo autor

6.2 Resultados e discussões

A análise dos resultados será feita de forma exploratória, a partir dos dados das métricas citadas anteriormente. Todos os resultados obtidos, para as duas orientações, os três modelos e as três variações de malha são apresentadas na Figura 75. É importante destacar dois aspectos da análise dos resultados, primeiro que os valores não devem ser tomados de forma absoluta, buscando avaliar o desempenho de maneira isolada, mas sim de forma comparativa; segundo que não é possível definir qual dos valores seria admitido como referencial, tendo em vista a variabilidade natural das análises, entretanto, as métricas de ALNe e ESA podem ser referenciadas pela malha proposta pelo normativo que as define, o que não acontece com as demais.

Figura 75 - Resultados de EMA, UMA, ALNe, ESA e IULN para a última etapa de análise



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a Iluminância, aqui tomada como iluminância média anual, observa-se que os resultados obtidos na malha proposta são sempre muito próximos das duas outras malhas estudadas. Para os modelos orientados a Leste a diferença percentual não ultrapassa os 5%, enquanto que aqueles orientados a Sul a esse valor chega a 9,5% no modelo A quando comparada a malha proposta com a da ABNT. De forma geral observa-se que a malha da IES tende a resultar em valores menores de EMA nos modelos com maior visão de céu (B e C), comportamento que a malha proposta acompanha quando comparada à malha da ABNT.

A uniformidade da iluminância resultou em valores maiores para a malha proposta que as demais para os modelos com maior (C) e menor (A) visão de céu. No modelo intermediário (B) observa-se tendência contrária, sendo esse comportamento mais evidente no modelo com janela orientada a leste. Vale ressaltar que para essa última orientação o cânion urbano está orientado no sentido norte-sul, fazendo com que a incidência solar no ambiente seja, em sua maioria, nos períodos próximos ao meio dia, o que implica em incidência solar direta nas regiões próximas à janela.

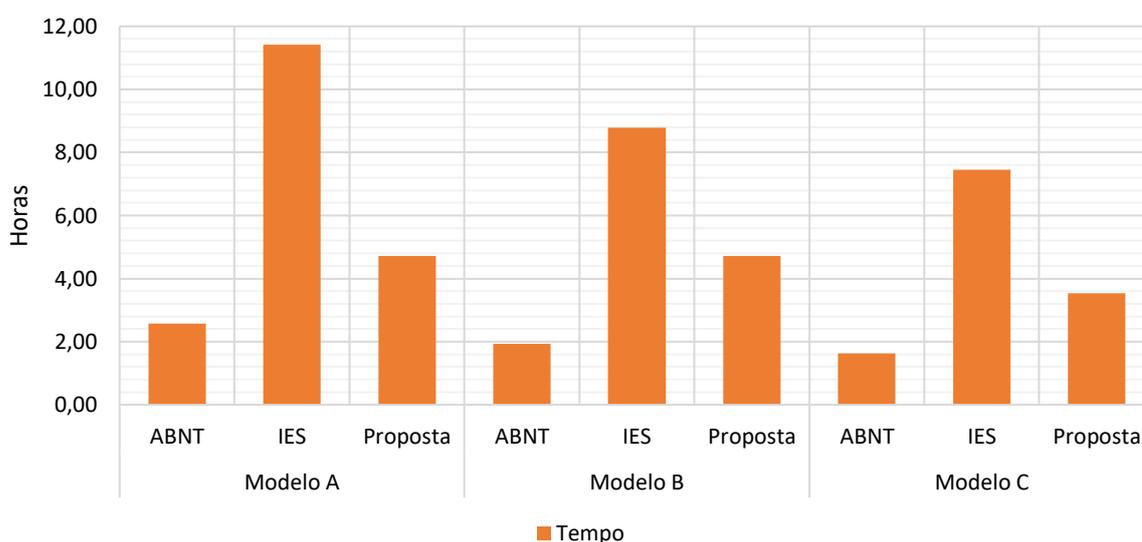
Para as duas métricas propostas pela IES (2012), a ALNe e a ESA, os comportamentos da malha proposta são, em sua maioria, mais próximos à malha da IES que os obtidos na malha da ABNT. Para a ALNe apenas nos modelos com menor visão de céu (A e B) a malha proposta superestimou os valores, enquanto que nos demais casos seus resultados se aproximaram mais daqueles obtidos na malha da IES.

Para a ESA observa-se que a malha da ABNT superestima, em todas as situações, o valor da métrica e que a malha proposta, principalmente nos modelos com maior visão de céu, tende a aproximar os resultados daqueles obtidos com a malha da IES. É importante destacar que a ESA é calculada apenas com a iluminância direta do sol, e que no caso da malha proposta são utilizados menos da metade dos pontos que a malha da IES propõe, com uma diferença no valor final da métrica de 10%. Importante destacar que os valores de ESA para a orientação Leste foram zero. Tendo em vista a orientação da janela seria esperado valor de ESA maior que zero, entretanto por conta da obstrução dos edifícios de entorno e da orientação do cânion urbano os instantes em que são registrados a ESA não alcançaram as 250h por ano, chegando no máximo a 187h.

Para a IULN, nas faixas 2 e 3, os resultados para as três malhas estudadas são equivalentes, as diferenças percentuais em todos os casos não chegam a 2%, indicando que todas conseguiram atingir desempenho semelhante.

Mesmo tendo resultados com uma margem de erro pequena vale destacar que a quantidade de horas de processamento foi diferente para as malhas simuladas. Os tempos de processamento para os modelos é apresentado na Figura 76. O hardware utilizado no processamento foi um notebook Dell com processador Intel(R) Core (TM) i7-8565U CPU @ 1.80GHz, 1992 Mhz, 4 Núcleos, 8 Processadores Lógicos, 8GB RAM, Sistema Operacional Microsoft Windows 10 Home x64.

Figura 76 - Tempo de processamento para os modelos e malhas estudados



Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que o tempo de processamento da malha proposta é sempre maior do que o da malha da ABNT, entretanto, muito inferior ao da malha da IES. Vale destacar que, para a malha proposta, a diferença no tempo de processamento para a componente direta é muito pequena, mesmo o modelo B tendo mais pontos que os demais.

6.3 Conclusão

O cálculo das métricas de avaliação do desempenho da luz natural está diretamente relacionado com os parâmetros de simulação utilizados, sendo a malha um dos principais. Observou-se que existe diferença nos resultados utilizando diferentes malhas, que se refletem também no tempo de processamento total da simulação.

A malha proposta se mostrou eficiente em calcular as métricas de EMA, UMA, ALNe, ESA e IULN com tempo de processamento inferior ao das malhas previstas pelos normativos que as definem. As diferenças percentuais para as métricas atingiram sempre valores pequenos quando comparados os resultados para as malhas da IES e a proposta. A malha da ABNT se

mostrou insuficiente em diversas métricas, por vezes superestimando os valores, como no caso da ESA.

Observa-se também que a estratégia de divisão da malha em duas, uma para a componente direta e outra para a refletida, funcionou bem, garantindo redução no tempo de processamento e mantendo, com uma margem de erro, a similaridade entre os resultados. Vale destacar que os valores utilizados para definição da densidade de pontos por setor podem ser menos conservadores, permitindo que mais setores possuam maiores quantidades de ponto para a malha da componente direta. Algumas regiões, como aquelas da linha mais próxima à abertura, poderiam ter melhor avaliação da componente direta com mais pontos.

7 CONCLUSÃO FINAL

A utilização de parâmetros de desempenho das edificações permite verificar se as escolhas de projeto promovem a utilização dos meios naturais nas edificações, em especial a iluminação natural. As métricas de avaliação do desempenho da luz natural surgem nesse contexto a fim de possibilitar a verificação do desempenho dos ambientes de forma mais objetiva, com parâmetros definidos e metas a serem alcançadas.

Dentre as métricas de avaliação do desempenho da luz natural apresentadas na seção 2.2 algumas se destacaram ao longo do tempo por sua aplicabilidade e pela especificidade em avaliar determinados aspectos, como o caso da ESA e a avaliação da entrada de luz solar direta. Outras caíram em desuso por sua aplicação ser muito restrita ou por terem sido substituídas por outras de maior aplicabilidade. Métricas como a ALNt e a SLN são pouco utilizadas se comparadas a ALN ou a IULN. Outras mais simples como a iluminância, seja em valor absoluto ou calculada anualmente como a EMA, ou a uniformidade tem seu uso previsto ao longo de todo o espaço temporal no qual a pesquisa se baseou.

A utilização de tais ferramentas pressupõe que o pesquisador defina alguns parâmetros como quantidade de dias e horas, tipo de céu e quantidade de sensores na região de estudo. A definição de tais parâmetros pode impactar no cálculo da métrica e algumas vezes inviabilizar sua aplicação. Sua definição é baseada no que os normativos e documentos que as regem preconizam como necessário para o seu cálculo, entretanto, como apresentado na seção 2.3, algumas métricas não informam tais valores, ou deixam a critério do pesquisador sua definição. As métricas mais recentes, a exemplo da ALNe e da ESA, definem de forma precisa a quantidade de pontos.

Essa distribuição dos pontos acontece em todos os normativos de forma uniforme pelo plano de trabalho e independem da distância à abertura ou do grau de obstrução de céu que o plano de estudo esteja submetido. Essa característica pode fazer com que a quantidade de pontos não seja a necessária ou seja excessiva para a definição da métrica.

7.1 Objetivos da tese

A tese teve como objetivo identificar a relação entre a malha de pontos e o cálculo das métricas de avaliação de desempenho da luz natural a fim de propor recomendações para malhas não uniformes. As conclusões obtidas nas três etapas da pesquisa serão apresentadas de forma sequencial, em vista a responder a todos os objetivos da tese. Toda a pesquisa foi dividida em três etapas que compreendem os quatro objetivos específicos propostos para estudo. A primeira

fase aborda o primeiro objetivo específico e visa identificar a influência da quantidade total de pontos da malha no cálculo das métricas de avaliação do desempenho luminoso.

Já na segunda fase foi verificada a influência da variação da densidade de setores e sua relação com o cálculo da iluminância global e suas componentes. A mudança de objetos de estudo, que na primeira fase compreendia as métricas e na segunda a iluminância e suas componentes, se deu baseada nos resultados e conclusões verificados na primeira fase que serão apresentados na seção seguinte.

A terceira e última etapa da pesquisa buscou avaliar a relação entre as variáveis de latitude e obstrução de entorno na setorização do plano de trabalho e na densidade de pontos no setor. Posteriormente foi proposta uma metodologia para a definição da malha de pontos com densidades não uniformes. Ao final foi realizado uma aplicação da metodologia proposta a fim de verificar sua efetividade.

7.2 Densidade de pontos

Na primeira fase da tese foi possível identificar a influência da quantidade total de pontos da malha no cálculo das métricas de avaliação do desempenho luminoso. Os resultados apontam que há importantes relações entre as métricas e a quantidade de pontos no plano de trabalho. Ambientes com aberturas voltadas a orientações em que há entrada de luz solar direta em algum momento do dia apresentaram relação mais forte entre a malha de pontos e a variabilidade dos índices estudados.

A avaliação isolada dos índices que compõem a iluminância global aponta que há relações distintas entre eles e a malha de pontos. A luz vinda do sol, seja direta ou refletida, necessitou de mais pontos de análise para que os resultados da EMA se estabilizassem, ao contrário das componentes de céu, principalmente a direta, onde malhas menores já apresentaram estabilização dos valores.

Para atingir valores estáveis de EMA foi necessária malha de 3x3 pontos no modelo com abertura voltada a sul e de 6x6 no modelo com abertura voltada a leste, que correspondem a densidades de 0,3 pt/m² e 1,0 pt/m² respectivamente. A uniformidade apresenta mesmo comportamento para malhas de 5x5 pontos nos modelos orientados a sul e 10x10 pontos na janela voltada a leste, que correspondem a densidades de 0,7 pt/m² e 2,8 pt/m² respectivamente. Observa-se que orientações com maior entrada de luz solar direta necessitam de malhas com mais pontos de análise. A avaliação das demais métricas apontou que para o cálculo da ALN,

ALNc, ALNe e IULN uma malha de 6x6, com densidade de 1,0 pt/m², consegue obter resultados estatisticamente estáveis com pouca margem de diferença.

A ALNe apresentou um comportamento distinto das demais, necessitando de uma malha de 11x11 pontos, ou 3,36 pt/m², para a orientação com maior entrada de luz solar. Esse comportamento indica que quando há entrada de sol direto, ou se deseja analisar especificamente a ESA, há a necessidade de uma densidade maior de pontos no plano de trabalho para sua correta caracterização. Esse resultado já aponta que a separação entre malha de componente direta e refletida é indicada.

Diante do modelo e situações estudadas é possível afirmar para a etapa inicial da tese que a densidade de pontos deverá ser maior que 2,8 pt/m² e que em situações onde se deseje estudar a componente solar direta se utilize 3,36 pt/m². Análises utilizando outros valores referenciais de ALN podem melhorar a avaliação desse índice, já que para o referencial adotado os resultados não foram significativos. Essa densidade de pontos foi verificada de forma global em todo o plano de trabalho, entretanto, algumas regiões como aquelas mais distantes da abertura não necessitam desta quantidade de pontos, tendo em vista a reduzida visão de céu. Esses valores de densidade obtidos nas fases iniciais da tese foram revistos quando da determinação da malha de densidade não uniforme.

A adoção de tais referenciais implica em malhas com densidade alta de pontos. Tomando como exemplo um ambiente de 4,0 m de largura e 6,0 m de comprimento a utilização da maior densidade prevista anteriormente resulta em uma malha com 81 pontos distribuídos uniformemente no plano de trabalho. Se calculada a malha utilizando as mesmas dimensões de ambiente para o documento da IES (IES, 2012) e a norma da ABNT (ABNT, 2005c) são obtidos valores de 16 e 70 pontos respectivamente. Observa-se que a malha prevista pela primeira fase do estudo é superior à dos normativos indicados, onerando o processamento de forma significativa.

As densidades previstas para métricas que se utilizam do valor global de iluminância, como a EMA e a UMA apresentam comportamento distinto daquelas que se utilizam de suas componentes, como no caso da ESA. Esse aspecto fundamenta a proposta de que malhas com densidades diferentes de pontos para o cálculo das métricas permitem ganhos em tempo de processamento sem perda de precisão dos resultados.

Importante destacar essa fase do estudo por permitir observar que as componentes da luz natural possuem maior sensibilidade que as métricas frente a variação da malha de pontos.

Isso se dá porque o cálculo de todas as métricas tem como base a iluminância e as suas componentes, justificando seu uso nas das próximas etapas da tese.

7.3 Setorização do plano de trabalho

Para avaliar a influência da divisão do plano de trabalho em setores e a sua relação com o cálculo da EMA e suas componentes foi realizada a segunda fase do estudo. Nesse sentido o plano de trabalho foi dividido em nove setores de mesma área e foram estudados os comportamentos dentro dos setores quanto à densidade de pontos necessária para estabilização dos resultados.

Nessa fase verificou-se que algumas regiões do plano de trabalho possuem comportamentos distintos e que a divisão da malha por setores permite apontar densidades diferentes de pontos em cada um deles. Setores mais próximos a abertura tendem a necessitar de mais pontos para estabilização dos resultados de EMA e suas componentes, enquanto que aqueles mais distantes necessitam de menos pontos. Uma relação importante observada foi que os setores que careceram de mais pontos normalmente foram aqueles com maior visão de céu. A componente direta, nesse sentido, foi aquela que apresentou maior sensibilidade à variação da densidade de pontos dentro do setor e da sua posição no ambiente.

Para a EMA direta observa-se uma relação importante com a componente de luz solar dentro do ambiente, onde regiões de maior incidência apresentaram necessidade de mais pontos. Para o ambiente orientado a sul a malha dentro do setor que atende aos requisitos de todos os setores é a de 6x6, que se reflete em uma malha no plano de trabalho completo de 18x18, totalizando 324 pontos. Essa malha é superior àquela prevista na fase anterior do trabalho, de 10x10 pontos. Para o modelo com abertura orientada a leste acontece o mesmo comportamento. Quando comparado com o resultado da fase anterior, que indica malha necessária de 6x6 pontos, observa-se que o aumento é ainda mais significativo.

Esses comportamentos reafirmam a proposição de que a densidade de pontos dentro do setor deverá ser tratada de forma individualizada observando cada situação de visão de céu. A adoção de uma densidade única visando atender àqueles setores com maior visão de céu faz com que as regiões mais distantes da abertura tenham pontos em excesso, onerando o processamento de forma desnecessária.

Ao estudar a componente refletida é possível observar que a quantidade de pontos necessária é menor que a da componente direta, cujos setores se mantêm próximos da malha de 2x2 na maioria dos casos estudados. Apenas em situações específicas, como nos setores ao

fundo do ambiente, foram observadas maiores malhas dentro do setor necessárias à estabilização dos resultados. A verificação de que a componente refletida necessita de menos pontos de análise que a componente direta corrobora com a hipótese de que a separação das malhas por componentes pode fazer com que o processamento tenha precisão de resultados equivalente com menos pontos.

O comportamento distinto entre os setores e a definição de densidades de pontos para regiões diferentes do plano de trabalho, observadas nas duas primeiras fases da tese, confirmam o que foi postulado por outros autores (BREMBILLA; MARDALJEVIC; ANSELMO, 2015) e permitiu fundamentar as etapas seguintes da pesquisa. Mesmo as normas internacionais não levam em conta essa distinção de comportamento entre setores diferentes do ambiente e adotam uma malha regular e uniforme em todo o plano de trabalho.

7.4 Malha de densidade não uniforme

As conclusões das duas fases anteriores permitiram verificar que: as componentes da luz natural são mais sensíveis que as métricas frente à variação na quantidade de pontos; que setores diferentes do plano de trabalho possuem comportamentos distintos e necessitam de quantidades diferentes de pontos para estabilização dos seus resultados, e que as componentes direta e refletida tem comportamentos distintos entre si. Diante delas foi estruturada a última fase do estudo, em que foram avaliados outros parâmetros que até então não tinham sido verificados, como latitude e obstrução de entorno. A estruturação da última etapa permitiu ainda a proposição de uma malha de densidades não uniformes.

Os resultados apontam que todas as variáveis estudadas apresentaram algum tipo de influência sobre os resultados de quantidades de pontos e de setores necessários à estabilização dos resultados de iluminância, que pôde ser observada principalmente na análise exploratória dos dados, entretanto, algumas delas se mostraram mais importantes que outras.

A obstrução de entorno foi o parâmetro que proporcionou as maiores diferenças entre os modelos estudados dentro da metodologia proposta para análise dos dados. Sua influência direta na visão de céu fez com que o comportamento da quantidade de pontos por setor necessária à estabilização dos resultados de iluminância estivessem sempre relacionadas. Modelos com menor visão de céu tenderam necessitar de menos pontos de análises que aqueles com maior visão de céu.

Para a malha da componente direta o parâmetro utilizado como referência foi o FVC, e observou-se que a região de transição entre setores, com e sem visão de céu, foi aquela que

necessitou de mais pontos de análise para sua correta identificação se comparadas as demais. Essa região de transição, bem como os setores com grande variação da visão de céu, são as mais importantes de serem avaliadas, pois foram as que necessitaram de mais pontos para estabilização dos resultados. Para os modelos sem visão de céu os setores mais próximos às paredes foram aqueles que requereram malhas setoriais mais densas, enquanto que nos demais modelos a proximidade com a abertura foi o parâmetro definidor.

Vale destacar que as regiões mais próximas às paredes normalmente são desconsideradas no cálculo das métricas. A norma brasileira NBR 15215-4 define que “Deve-se planejar a malha evitando pontos muito próximos às paredes” (ABNT, 2005c, p.7), utilizando afastamento de 0,5 m, enquanto que o documento da IES (IES, 2012) orienta afastamento mínimo de 0,3 m para as paredes. Para o presente estudo a setorização foi variada de forma a ultrapassar esse limite, sendo possível verificar que os setores mais próximos às paredes, inclusive nos casos em que todo ele estava na região desconsiderada pelos normativos, a necessidade de pontos aumentava consideravelmente. Desconsiderar tais regiões implica dizer que elas não são importantes para a atividade realizada no plano de trabalho ou que elas não estão no campo visual do observador de forma a causar desconforto.

A orientação do modelo, que implica diretamente na recepção de insolação direta no plano de trabalho, também foi um parâmetro importante, principalmente para as regiões com visão de céu, entretanto, não foi tão definidor quanto a obstrução de entorno. Para as duas orientações estudadas observa-se que, como apontado anteriormente, a região de transição entre os setores com e sem visão de céu é o ponto crítico, bem como aqueles setores mais próximos à abertura. Nos modelos orientados a leste, em que há maior penetração da luz solar, observou-se a necessidade de mais pontos que aqueles orientados a sul.

Após todas as etapas de avaliação dos dados, de forma exploratória e estatística, foi possível definir uma proposta de malha não uniforme. Essa baseia-se na divisão da malha total em duas malhas secundárias, sendo uma para o cálculo da iluminância direta e outra para a refletida. Um fluxograma com a metodologia de cálculo da proposta foi apresentado na Figura 69. O cálculo da malha não-uniforme divide-se em 3 etapas, cuja primeira é a definição da setorização, a segunda um pré-processamento para cálculo de parâmetros que definirão a terceira onde são calculados os pontos por setor.

Para a malha direta a densidade proposta é de 1,0 set/m² e para a malha refletida 0,4 set/m² por apresentaram os melhores resultados para quantidade de pontos. Determinada a

setorização a etapa seguinte visa calcular os parâmetros definidores da densidade. Para a malha direta foi utilizado o coeficiente de variação do Fator Visão de Céu (CV-FVC). A utilização do FVC limita a generalização do método, tendo em vista que janelas posicionadas diferente daquelas utilizadas no estudo, como as aberturas zenitais, possuem maior visão de céu e teriam como consequência uma quantidade excessiva de pontos. A utilização do CV-FVC atende também a uma observação feita na análise exploratória, onde os setores de transição, ou os setores com grande variação de visão de céu, são aqueles que necessitam de mais pontos de análise. Para a malha da componente direta foi definido um valor de CV-FVC divisor de 0,6, em que setores que estão abaixo dele a densidade de pontos é de 1,0 pt/m² e setores acima a densidade é de 9,0 pt/m².

Para a malha da componente refletida o parâmetro utilizado foi a distância angular (DA) à janela. Ela foi preterida em detrimento da distância linear por permitir que mudanças na altura da abertura pudessem ser melhor consideradas. Nesse sentido foi proposto um valor referencial de 50°, em que setores cuja DA máxima o ultrapassam a densidade de pontos é de 0,4 pt/m² e nos demais de 7,0 pt/m².

7.5 Ferramentas de estatística

Todos os estudos foram baseados no que foi denominado de malha setorial mínima (MSmin). A utilização de ferramentas da estatística nesta etapa do trabalho foi de fundamental importância para compreensão dos resultados obtidos e para a definição da MSmin. Os testes de ANOVA e Tukey permitiram a definição precisa das diferenças entre as malhas dentro do setor, bem como a identificação do ponto em que os valores de iluminância ou das métricas estudadas adquirem estabilidade estatística.

Dois aspectos foram evidentes na utilização dos testes estatísticos. Aproximadamente 30% das séries de dados analisadas apresentaram valores espúrios, situações em que, para uma determinada malha dentro do setor, acontece um valor de pico de iluminância que depois volta a se estabilizar. A ocorrência de tais casos pode fazer com que o resultado do teste de ANOVA chegue a conclusões equivocadas sobre a série de dados, por isso fez-se necessária a identificação e tratamento desses casos.

Os valores espúrios ocorrem nas séries em situações específicas, e estão diretamente relacionados com a distribuição dos pontos no plano. Para a componente direta eles aconteceram quando a incidência solar foi computada de forma insuficiente, por poucos pontos no plano de trabalho. Vale destacar que a utilização do céu DDL faz com que a presença de sol

visível em dias e horas específicos coincidam com distribuições de pontos que favoreçam o pico de iluminância média. Para a componente refletida os valores espúrios aconteceram principalmente nos setores com maior visão de céu.

Outra situação foi observada nos resultados para o teste de Tukey. Ao definir os agrupamentos de malhas setoriais com mesmo comportamento estatístico o teste separava conjuntos de EMA com valores muito próximos, mas estatisticamente diferentes. A sensibilidade dos testes estatísticos à variação da iluminância é diferente da sensibilidade humana, e por vezes a utilização sem a devida avaliação do método escolhido e do resultado pode chegar a conclusões equivocadas sobre os conjuntos de dados. Esse comportamento não comprometeu a análise dos resultados pois ocorreu em menos de 5% das séries de dados utilizadas para a definição da proposta de malhas não-uniformes, entretanto, é importante destacar essa característica do teste.

7.6 Aplicação da malha de densidade não uniforme

A última etapa da tese foi a aplicação da metodologia proposta e a comparação dos resultados com as malhas previstas pela norma brasileira (ABNT, 2013) e pelo documento da IES (IES, 2012). Foram analisadas as métricas de EMA, UMA, ALNe, ESA e IULN utilizadas na primeira fase dos estudos.

Observou-se que a adoção da malha de densidade não uniforme permitiu calcular as métricas com tempo de processamento inferior à malha da IES e semelhante ao da malha proposta pela ABNT. Vale destacar que os resultados da malha da ABNT foram os que apresentaram maior diferença com relação às demais, em alguns casos superestimando os valores de ESA e de UMA.

Obter um menor tempo de processamento associado à manutenção do valor da métrica estudada é uma contribuição importante da utilização de malha de densidade não uniforme. Durante o processo e projeto a agilidade em fornecer respostas e informações relativas às decisões tomadas é importante para promover a incorporação da simulação computacional nesse processo.

A divisão da malha em componente direta e refletida proporcionou importantes ganhos de tempo de processamento sem perda significativa na precisão das métricas calculadas. Importante destacar que os valores utilizados para definição da densidade de pontos por setor podem ser menos conservadores, garantindo que os setores mais próximos à abertura possuam mais pontos de análise.

7.7 Limitações

A aplicabilidade do método, tendo em vista as limitações no conjunto de dados utilizado, pode ser ampliada. Não foram avaliados modelos com aberturas zenitais, janelas de menores dimensões ou a utilização de protetores solares de maior complexidade. A metodologia de avaliação dos resultados utilizada pode ser aplicada a essas novas situações, seguindo as mesmas etapas e permitindo o ajuste ou a definição de novos parâmetros.

Outra questão observada na tese é que para a malha refletida poderia ter sido escolhido outro parâmetro definidor da densidade que não a distância à janela. A distância às superfícies apresentou importantes relações com a densidade de pontos e é um parâmetro que pode ser melhor avaliado.

Alguns parâmetros de processamento também precisam ser melhor observados, como a quantidade de dias e horas ou a influência do tipo de céu. Importante destacar que as métricas utilizadas se baseiam em conceitos CBDM, onde os resultados são calculados a partir de dados meteorológicos obtidos dia a dia e hora a hora. Essa forma de análise dilui as particularidades de cada tipo de céu, fazendo com que eventos singulares sejam minimizados quando se avalia o desempenho anual. O comportamento da variável de sol direto nesse caso fica comprometido visto que as horas de sol visível para cada dia varia conforme o período do ano. Isso pôde ser observado de forma direta na aplicação da malha proposta em que uma janela orientada a leste não apresentou valores de ESA.

Algumas variações geométricas também são importantes, como o tamanho do ambiente e as obstruções externas. A refletância das superfícies internas não foi estudada, e é sabido que ela influencia de forma significativa a distribuição da iluminância no plano de trabalho, principalmente para a malha da componente refletida.

7.8 Dando continuidade à pesquisa

As limitações apresentadas anteriormente já permitem vislumbrar parcialmente as sugestões de trabalhos futuros. A análise de outros parâmetros sejam eles geométricos, como o tamanho do ambiente ou a refletância das paredes, ou de processamento como dias, horas e tipo de céu, permitirão ajustar os limites de setorização e densidade de pontos por setor avaliados no trabalho.

Os parâmetros de definição da setorização e da densidade de pontos também podem ser melhor estudados. A utilização da distância à abertura como definidor para a malha direta encontra uma barreira em estudos de ambientes com formas não retangulares, como salas em L

ou ambientes de geometria mais complexa. Tais ambientes devem ser estudados a fim de permitir neles a definição de malhas não uniformes. O tamanho do ambiente também deverá ser melhor observado, tendo em vista que foram utilizados apenas ambientes com proporção 1:1 ou 1:2.

Outro aspecto importante de ser tratado posteriormente é se a setorização do plano de trabalho em regiões regulares pode ser aprimorada. A utilização de setores menores nas regiões de maior incidência da luz natural, e de setores maiores nas demais, pode permitir que os resultados sejam melhores, mesmo que isso não signifique uma quantidade menor de pontos. A adoção de um referencial retangular para a setorização também pode ser melhor estudada, prevendo linhas de pontos no ambiente, sejam elas retas ou curvas.

7.9 Considerações finais

A proposição de uma malha não uniforme vem atender a uma necessidade observada no início do trabalho. Duas questões foram apontadas como limitadoras da maior utilização das ferramentas de simulação na análise de projetos de arquitetura: a capacitação do usuário e a utilização da ferramenta.

Definir uma metodologia de malha que permite a obtenção de dados de forma mais rápida e com menor custo operacional permite que a avaliação de desempenho se torne mais atrativa ao projetista, que busca resultados mais rápidos e assertivos dentro do processo de projeto. A adoção de malhas com menos pontos, implicando em um ganho operacional e de tempo no processo de projeto permite que sua adoção seja mais interessante e eficiente.

O fato de que cada métrica requer uma malha de pontos diferente apresenta-se como um limitador de sua aplicação, sendo necessário o constante ajuste dos parâmetros de processamentos e repetidos processamentos para a definição de todas elas. A adoção de uma malha única que leva em consideração a geometria do modelo para a sua definição permitiu, para os estudos e modelos analisados, menos pontos de análise com precisão semelhante dos resultados.

É certo que as formas de setorização do plano de trabalho bem como a definição da densidade de pontos por região ainda necessitam de muito estudo, tendo em vista que a literatura apresenta poucos trabalhos que versem sobre esse tema. As proposições aqui apresentadas já permitem a definição e utilização das malhas não uniformes nas simulações em iluminação natural e são ponto de partida para novos desdobramentos.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, I.; CAMPANO M. A.; DOMÍNGUEZ, S.; FERNÁNDEZ-AGÜERA, J. Minimum daylight autonomy: a new concept to link daylight dynamic metrics with daylight factors. **Leukos**, v. 15, n. 4, p.251-269, 2019.
- ALBUQUERQUE, M. S. C.; AMORIM, C. N. D. Iluminação natural: indicações de profundidade-limite de ambientes para iluminação natural no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais - RTQ-R. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 37-57, 2012.
- ALMEIDA, M.; RUIZ, E. O.; GRAÇA, V. A. C. Iluminação natural e saúde em salas de aula: a melhoria do desempenho ambiental através do controle da radiação solar direta no IFSP-SP. **Sinergia**, v. 13, n. 1, p. 42-53, 2012.
- AMOLE, D. Residential satisfaction in students' housing. **Journal of Environmental Psychology**, v. 29, n. 1, p.76-85, 2009.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO/CIE 8995-1: Iluminação de Ambientes de Trabalho - Parte 1 - Interior**. Rio de Janeiro, 2013a.
- _____. **NBR 15215-2: Iluminação Natural - Parte 2 - procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural**. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **NBR 15215-3: Iluminação Natural - Parte 3 - procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos**. Rio de Janeiro, 2005b.
- _____. **NBR 15215-4: Iluminação Natural - Parte 4 - verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - método de medição**. Rio de Janeiro, 2005c.
- _____. **NBR 15575-1: Edificações Habitacionais - Desempenho - Parte 1 - Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2013b.
- ANDRADE, M. L. V. X.; RUSCHEL, R. C.; MOREIRA, D. C. O processo e os métodos. In: KOWALTOWSKI, D.C.C.K.; MOREIRA, D.C.; PETRECHE, J.R.D.; FABRICIO, M.M. (Org.). **O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia**. 1ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011, p. 80-100.
- ARAÚJO, I. A. L.; CABÚS, R. C. influência da luz natural refletida pelo entorno na iluminação de edifícios em cânions urbanos no trópico úmido. In: ENCAC - ENCONTRO NACIONAL

DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007, Ouro Preto. **Anais [...]**. Ouro Preto: ANTAC, 2007. p. 86-95.

ASE - ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS. SN 418911: **Eclairage intérieur par la lumière du jour**. Association Suisse des Electriciens. Zurich: ASE, 1989.

ATKINSON, W. **The orientation of buildings: planning for sunlight**. Nova York: John Wiley & Sons, 1912.

BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, K. **Daylighting in architecture: A European Reference Book**. Londres: James & James, 1993, 192 p.

BAKER, N.; STEEMERS, K. **Daylight design of buildings**. 1. ed. Londres: James, 2002.

BARBOSA, G. B. **Arquitetura contemporânea em Maceió (1980-2008): uma reflexão crítica**. Maceió, 2009. 175p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado). Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

BARTHOLOMEI, C. L. B. **Influência da vegetação no conforto térmico urbano e no ambiente construído**. 2003. 189p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2003.

BITTENCOURT, L. **Uso das cartas solares: diretrizes para arquitetos**. Maceió: EDUFAL, 2015.

BOYCE, P. R. Illumination: Basic definition. In: KARWOWSKI, W. (Ed.). **International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors**. Londres: Taylor & Francis, 2010. p. 1016-1021.

BRASIL. Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética edificações residenciais. **Diário Oficial da União**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional De Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO. Rio de Janeiro, 2012.

BREEAM - BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT ENVIRONMENTAL ASSESSMENT METHOD. **Health and Wellbeing 01 Visual comfort**. Londres: BRE, 2014.

_____. **BREEAM International New Construction 2016**. Londres: BRE, 2016.

BREMBILLA, E.; MARDALJEVIC, J.; ANSELMO, F. The effect of the analysis grid on daylight simulations with climate-based daylight modelling. In: THE 28TH SESSION OF THE INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION: CIE 2015, Manchester, 2015. **Anais [...]**. Manchester: CIE, 2015, p. 125 - 135.

BROKES, S. W. A. C. Simple scale models for daylighting design: Analysis of sources of error in illuminance prediction. **Lighting Research and Technology**. v. 29, p. 135-142, 1997.

BUNCHAFT, G.; KELLNER, S. R. O. **Estatística sem mistérios**. 2.ed. Petrópolis: Vozes, 1999. v.2, 303p.

CABEZUELO, Ó. L. **Optimización del vínculo entre las métricas estáticas y dinámicas en el cálculo de la iluminación natural: Mimum Daylight Autonomy**. 2019. 95 f. Tese (Doutorado) - Curso de Fundamentos de Arquitectura, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2019.

CABÚS, R. C. **Análise do desempenho luminoso de sistemas de iluminação zenital em função da distribuição de iluminâncias**. 1997. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1997.

_____. **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in North-east Brazil**. 2002. 288p. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Universidade de Sheffield. Sheffield, Inglaterra, 2002.

_____. TropLux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO, 4., ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2005, Maceió, **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, p. 240 - 249, 2005.

CABÚS, R. C.; RIBEIRO, P. V. S. **Aprendendo a utilizar o TropSolar 5**. 1. ed. Maceió: Instituto Lumeeiro, 2015. 26p.

CEC - CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **CEC 500-06-039: Daylight Metrics**. São Francisco: CEC, 2012.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CARVALHO, C. R. **Avaliação do programa Apolux segundo protocolos do relatório CIE 171:2006 referentes a iluminação natural**. 2009. 324 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

CARVALHO, M. L. S. **Eficiência da luz solar refletida e desempenho de dispositivos de sombreamento**: estudo para salas de aula na cidade de Maceió. 2018. 196 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

CARVALHO, J. P. V. de; HAZBOUN, V. D.; CARVALHO, A. S.; PEDRINI, A. The impact of occupant behavior on daylight performance of an office room in a tropical climate. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 12, n. 3, p. 234-244, 2018.

CASTANHO, A. G. **Avaliação e calibração de um céu artificial para estudos de iluminação natural com modelos físicos em escala reduzida**. Florianópolis, 2007. 122 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2007.

CHAPMAN L.; THORNES J.E.; BRADLEY A.V; Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets, **Theoretical and Applied Climatology**, n.69, p. 81-89, 2002.

CHEN, L.; NG, E.; AN, C.; REN, C.; LEE, M.; WANG, U.; HE, Z. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach, **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 121-136, 2012.

CHIPS - LIGHTING AND DAYLIGHTING COMMITTEE FOR THE COLLABORATIVE FOR HIGH PERFORMANCE SCHOOLS. Lighting and daylighting committee for the collaborative for high performance schools. **High Performance Schools: Best Practices Manual**. Sacramento: CHIPS, 2006. 641 p.

CIBSE - CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. **Lighting guide 10: Daylighting and Windows Design**. Londres: CIBSE, 1999. 482 p.

_____. **LG10/14: Lighting Guide 10: Daylighting - a Guide for Designers**. Londres: CIBSE, 2014.

CIAMPINI, F. **Sistemas inovadores de iluminação natural**: estudo de seu desempenho sob condições de céu real em Campinas. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2005.

CIE - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE - CIE DS 011.2/E:2002. **Spatial distribution of daylight** - CIE standard general sky. Viena: CIE, 2002.

CLARO, A. **Modelo vetorial esférico para radiosidade aplicado à iluminação natural. Florianópolis**, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1998.

CLC - CANADIAN LABOR CODE. **Canadian labor code part II**: Occupational Safety & Health. Butterworths: CLC, 1991.

COHEN, M. F.; CHEN, S. E.; WALLACE, J. R.; GREENBERG, D. P. A progressive refinement approach to fast radiosity image generation. In: 15TH ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES - SIGGRAPH '88. **Anais [...]**, p.75-85, 1988.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos**: conforto ambiental. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Revan, 2010.

CORREIA, A. G. U.; CABÚS, R. C.; ARAÚJO, V. M. D. Estudo comparativo da aplicação de softwares de iluminação no nordeste brasileiro. In: IX LUXAMERICA - CONGRESO PANAMERICANO DE ILUMINACIÓN, 2008, Rosário. **Anais [...]**. Rosário: LUXAMERICA, 2008. v. 1. p. 50-59.

IVERSEN, A.; ROY, N.; HVASS, M.; JØRGENSEN, M.; CHRISTOFFERSEN, J.; OSTERHOUS, W.; JOHNSEN, K. **Daylight calculations in practice**: An investigation of the ability of nine daylight simulation programs to calculate the daylight factor in five typical rooms. Copenhagen: Danish Building Research Institute, Aalborg University, 2013.

DELBIN, S. **Inserção de simulação computacional de conforto ambiental de edifícios em ensino de projeto arquitetônico**: proposta de metodologia. 2006. 220 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2006.

DIAS, A. R. D.; CARVALHO, J. P. V.; HAZBOUN, V. D.; PEDRINI, A. Influência de métricas dinâmicas na avaliação do aproveitamento da luz natural em clima tropical. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 29-47, 2018.

DGN - DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS. **NOM-025-STPS-2008**: Condiciones de Iluminacion en los centros de trabajo. 1 ed. Mexico: DGN, 2008.

DOGAN, T; PARK, Y. A critical review of daylighting metrics for residential architecture and a new metric for cold and temperate climates. **Lighting Research & Technology**, Londres, p. 1-25, 2018.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Influência das tintas imobiliárias sobre o desempenho térmico e energético de edificações, In: ENCAC - ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007, **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC. p. 165-174, 2007.

DRESLER, A. The “Reflected Component” in daylighting design. **Lighting Research and Technology**, v. 19, n. 2, p.50-60, 1954.

DUFTON, A. F.; BECKETT, H. The heliodon: an instrument for demonstrating the apparent motion of the sun. **Journal of Scientific Instruments**, v. 9, n. 8, p.251-256, 1932.

EFA - EDUCATION FUNDING AGENCY. **EFA daylight design guide**: Departmental advice. Londres: EFA, 2014.

EDWARDS, B. **O guia básico para sustentabilidade**. Barcelona: Gustavo Gili, 2013.

ELALI, G. V. M. A. **Ambientes para educação infantil: um quebra-cabeça?**: contribuição metodológica na avaliação pós-ocupação de edificações e na elaboração de diretrizes para projetos arquitetônicos na área. 2002. 400 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

EL-HAGGAR, S.; MOUSA, S.; EL-MORSI, M. **Sustainable solar energy systems**: challenges and economics for the Arab world. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2016.

ENERGY DESIGN RESOURCES (California). **Design Brief**: Understanding Daylight Metrics. California: Energy Design Resources, 2017.

FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and application in environmental engineering**. Nova York: McGraw-Hill, 1970.

FERNANDES, J. T. **Qualidade da iluminação natural e o projeto arquitetônico: A relação da satisfação do usuário quanto à vista exterior da janela e a percepção de ofuscamento**, 2016. 339 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

FERNANDEZ, P. M. E. **Iluminación Natural Diseñada a través de la Arquitectura**. 2017. 634 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitectura, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2017.

FERREIRA, C. C. **Desenvolvimento de modelos matemáticos para a determinação da disponibilidade de luz natural no crepúsculo para a cidade de Belo Horizonte**. 2010. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FONSECA, R. W.; PEREIRA, F. O. R. Sequência metodológica para a estimativa da iluminação natural e suas implicações em sistemas de avaliação de desempenho de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 55-68, 2017.

FONSECA, R. W.; PEREIRA, F. O. R.; QUEIROZ, E. A.; STOCKHAUSENN, B. Latitude e condições climáticas locais: verificação da predominância no desempenho da luz natural e no consumo energético de iluminação. In: XV ENCAC ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E XI ELACAC - ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ANTAC, 2019. p. 2835-2845.

FONTENELLE, M. R., CLARO, A., ARAÚJO, B. C. D. Influência de elementos de proteção solar no conforto lumínico de um edifício residencial multifamiliar em Fortaleza. In.: ENCAC - ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E ELACAC - ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., Búzios, 2011. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ANTAC, 2011.

FONTOYNONT, M. **CIE Reportership R 3-30: daylighting metrics**. Horsholm: Cie, 2012.

FREIRE, M. R.; AMORIM, A. L. de. A abordagem BIM como contribuição para a eficiência energética no ambiente construído. In: V ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE

INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL (TIC 2011). **Anais [...]**. Salvador: ANTAC, 2011.

FROTA, A. B. **Geometria da insolação**. São Paulo: Geros, 2004.

GAITATZES, A.; MAVRIDIS, P.; PAPAIOANNOU, G. Interactive volume-based indirect illumination of dynamic scenes. **Intelligent Computer Graphics 2010**, p. 229-245, 2010.

GEEBELEN, B.; NEUCKERMANS, H. IDEA-I, a prototype of a natural lighting design tool for the early stages of the design process. In: TIMMERMANS, H. (Ed.). **Fifth Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning: Part one: Architecture Proceedings**. Nijkerk: The Netherlands, 2000. p. 124-131.

GHERRI, B. **Assessment of Daylight Performance in Buildings: Methods and Design Strategies**. Southampton: WIT Press, 2015.

GHISI, E.; LAMBERTS, R. Avaliação das condições de iluminação natural nas salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 1., 1997, Canela. **Anais [...]**. Canela: ANTAC, 1997, p. 183-188.

GIVONI, B. **Men, climate and architecture**. Londres: Elsevier, 1969.

GLASSNER, A.S. **An Introduction to Ray Tracing**. San Diego: Academic Press, 1989

GORAL, C. M.; TORRANCE, K. E.; GREENBERG D. P.; BATTAILE B. Modeling the Interaction of Light between Diffuse Surface. **Computer Graphics**, v. 18, n. 3, p. 213-222, 1984.

USGBC - GREEN BUILDING COUNCIL. **LEED V4: Building design and construction**. Washington: GBC, 2019.

GUIDI, C. R.; ABRAHÃO, K. C. de F. J.; VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G. de. Influência dos parâmetros urbanísticos e da topografia na admissão da luz natural em edifícios residenciais. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 49-66, 2018.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.; BABIN, B. **Multivariate data analysis (with readings)**. 4. ed. Prentice Hall: Ellglewood Cliffs, 1995. 475p

HARA, A. H.; PEREIRA, F. O. R. O acionamento das lâmpadas e das persianas em função da percepção da iluminação na entrada da sala. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 41-58, 2020.

HAREDY, A. **Simulation of photovoltaic airflow windows for indoor thermal and visual comfort and electricity generation**. 2016. 295p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Clima Urbano). Departamento de Arquitetura e Clima Urbano, Universidade de Nottingham, Nottingham, 2016.

HÄMMERLE, M., GÁL, T., UNGER, J., MATZARAKIS, A. Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 105(3-4), p. 521-527, 2011.

HODGE, V.; AUSTIN, J. A survey of outlier detection methodologies. **Artificial Intelligence Review**, v. 22, n. 2, p. 85-126, 2004.

HOPKINSON, R. G. **Architectural physics: lighting**. Londres: Her Majesty's Stationery Office, 1963. 372 p.

HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Daylighting**. Tradução de: Antônio Sarmento Lobato de Faria. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1966.

HOWELL, D. C. **Encyclopedia of statistics in behavioral science**. Nova York: John Wiley & Sons, 2005. 1300 p.

IES - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **The lighting handbook: Reference & Applications**. New York: Illuminating Engineering Society of North America. 9 ed, 2000.

_____. **The lighting handbook: Reference & Applications**. New York: Illuminating Engineering Society of North America. 10 ed., 2011.

_____. **LM-83-12: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**. New York, 2012.

ICC - INTERNATIONAL CODE COUNCIL. **International green construction code: international green construction code**. 1 ed. Washington: ICC, 2010.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil**. 2010. Disponível em: < <https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 04 de fevereiro de 2021.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **8995 CIE S 008/E: Lighting of indoor work places**. 2 ed. Genebra: ISO, 2002. 28 p.

JAKUBIEC, J.; REINHART, C. The 'adaptive zone' - A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces. **Lighting Research & Technology**, v. 44, n. 2, p.149-170, 2011.

JENNINGS, J. D.; RUBINSTEIN, F.; DIBARTOLOMEO, D. L. Comparison of control options in private offices in an advanced lighting controls testbed. **Journal of The Illuminating Engineering Society**, v. 29, n. 2, p.39-60, 2000.

JOHNSON, G. T.; WATSON, I. D. The determination of view-factors in urban canyons. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 23, n. 2, p. 329-335, 1984.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Printice Hall, 4 ed, 1998.

KESKIN, Z. **Investigating the effect of daylight on seating preferences in an open-plan space**: a comparison of methods. 2019. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura, University of Sheffield, Sheffield, 2019.

KIMBALL, H. H.; HAND, I. F. Daylight illumination on horizontal, vertical and sloping surfaces. **Monthly Weather**, n 50, ed. 12, p. 615-628, 1922.

KITTLER, R. Standardisation of the outdoor conditions for the calculation of the Daylight Factor with clear skies. In: CONFERENCE OF SUNLIGHT IN BUILDINGS, 1967, ROTERDÃ. **Anais [...]**. Roterdã: N. I., 1967. p. 273-286.

KLEINDIENST, S.; ANDERSEN, M. Comprehensive annual daylight design through a goal-based approach. **Building Research & Information**, v. 40, n. 2, p. 154-73, 2012.

KO, W. H.; BRAGER, G.; SCHIAVON, S.; SELKOWITZ, S. Building envelope impact on human performance and well-being: experimental study on view clarity. **California Digital Library**: University of California, Berkeley, v. 4, n. 2, p. 1-32, 2017.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; LABAKI, L. C.; PINA, S. M.; BERTOLLI, R. S. A visualização do conforto ambiental no projeto arquitetônico. In: VII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 1998, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: ANTAC, 1998. p. 27-36.

LAM, W. **Perception and lighting as formgivers for architecture**. Nova York: McGraw-Hill, 1977.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: PW Editores, 2014.

LARANJA, A. C. **Parâmetros urbanos e a disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno**. Rio de Janeiro, 2010. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LARANJA, A. C.; CABÚS, R. C.; ALVAREZ, C. E.; CORREIA, L. G. Análise das relações entre a geometria urbana e a orientação das aberturas na disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo (PUCMG)**, v. 20, p. 151-167, 2013.

LARANJA, A. C.; GAZZANEO, L. M. C.; CABÚS, R. C., interferências da largura das vias na disponibilidade de iluminação natural do ambiente interno. **Labor & Engenho** (Centro de Memória Unicamp), v. 3, p. 10-19, 2009.

LEAL, L. Q.; LEDER, S. M. Ofuscamento e entorno: estudo em edifícios residenciais multipavimentos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2016.

LEATHERBARROW, D.; MOSTAFAVI, M. **Surface architecture**. Cambridge: MIT Press, 2002.

LEDER, S. M.; PEREIRA, F. O. R. Ocupação Urbana e Disponibilidade de Luz Natural. **Revista Minerva**, v. 5, p. 129-138, 2008.

LIMA, R. C. **Interferência do entorno construído na disponibilidade de luz natural no interior do ambiente no litoral norte de Maceió - al**. Maceió, 2015. 147p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas do Espaço habitado da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

LINDELÖF, D.; MOREL, N. A field investigation of the intermediate light switching by users. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p.790-801, 2006.

LIOUTSKO, K. V.; SPIRIDONOV, A. V. Artificial sky for EU with large-scale architectural daylight models. **Lighting Research and Technology**. v. 24, p. 25-28, 1991.

LIRA, S. A. **Análise de Correlação: Abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. 2004. 209 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Métodos Numéricos em Engenharia, Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LITTLEFAIR, P. J. Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Londres, n. 2, p. 303-326, 1998.

LITTLEFAIR, P. J.; AIZLEWOOD, M.; BIRTLES, A. B. The Performance of Innovative Daylighting Systems. **Renewable Energy**, Londres, v. 5, n. 2, p. 920-934, 1994.

CRISP, V. H. C.; LITTLEFAIR, P. J. Average daylight factor prediction. In: NATIONAL LIGHTING CONFERENCE, Cambridge. **Anais [...]**. Londres: CIBSE, 1984. p. 234-243.

LOPES, J. M. B. **Radiosidade**. 2009. 25p. Monografia (Licenciatura em Engenharia Informática e de Computadores) - Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2009.

LOSS, J. **Iluminação artificial residencial: a percepção do usuário de Curitiba em ambientes de descanso**. 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MACEIÓ, Lei Municipal Nº 5.593, de 08 de fevereiro de 2007. Institui o Código de Urbanismo e Edificações do Município de Maceió. **Diário Oficial de Maceió**, 2007

MACIEL, A. A.; ONO, E.; LAMBERTS, R. Sol-Ar: uma ferramenta de suporte ao projeto de edificações ambientalmente integradas. In: IX ENCONTRO NACIONAL E V LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007, Ouro Preto: ANTAC, **Anais [...]**. Porto Alegre:ANTAC, 2007. p. 1103-1112.

MAIOLI, R. N. **Avaliação da influência do dispositivo prateleira de luz no conforto visual em edificação comercial com entorno obstruído**. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

MAIOLI, R. N.; ALVAREZ, C. E. de. Análise da utilização de prateleiras de luz em Vitória-ES (Brasil). **Hábitat Sustentable**, Concepción, v. 3, n. 1, p. 37-46, 2013.

MANGKUTO, R. A.; ROHMAH, M.; ASRI, A. D. Design optimization for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics. **Applied Energy**, Londres, v. 164, p. 211-219, 2016.

MANHAS, M. P. G. **Difusa ou especular? Estudando o desempenho da prateleira de luz segundo a refletância de sua superfície**. 2016. 212p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e

Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas do Espaço habitado da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

MARDALJEVIC, J. Examples of climate-based daylight modelling. In: CIBSE NATIONAL CONFERENCE 2006: ENGINEERING THE FUTURE. Londres, **Anais** [...]. Londres: CIBSE, 2006.

MARDALJEVIC, J.; ANDERSEN, M.; ROY, N.; CHRISTOFFERSEN, J. Daylighting metrics for residential buildings. In: SESSION OF THE CIE, 27., 2011, Sun City. **Anais** [...]. Sun City: CIE, 2011. v. 1, p. 1-19.

MARDALJEVIC, J; HESCHONG, L; LEE, e. Daylight metrics and energy savings. **Lighting Research & Technology**, v. 41, n. 3, p.261-283, 2009.

MARKS, L. B.; WOODWELL, J. J. Planning for daylight and sunlight in buildings. In: ANNUAL CONVENTION OF THE ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY, 1914, Cleveland. **Anais** [...]. Cleveland: IES, 1914. p. 643 - 673.

MARQUES, M. P. de P. **Análise da eficiência de elementos de proteção solar em relação ao sombreamento e a iluminação natural estudo de caso: salas de aula do Campus I da UFPB.** João Pessoa, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

MARTINS, L. F. **A análise da representação gráfica de projetos civis com CAD, BIM E RA para identificar as interferências de obra em projetos complementares.** 2018. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MEDEIROS, M. F. M. **Influência da temperatura de cor da luz no desempenho e sensações de alunos em baixa latitude.** 2018. 73f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005.

MICHEL, M. V.; LARANJA, A. C. Condições e tipos de céu para simulações de iluminação natural com céu estático. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. 1-18, 2020.

MINELLA, F. O.; ROSSI, F. A.; KRUGER, E. L. Influência do fator de visão de céu no conforto térmico em duas situações urbanas distintas. In: ENCAC - ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2009, Natal. **Anais [...]**. Natal: ANTAC, 2009. p. 208-217.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 14. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 490 p.

MOON, P. **The scientific basis of illuminating engineering**. Londres: McGraw-Hill, 1936. 620 p.

MOON, P.; SPENCER, D. Illumination from a non-uniform sky. **Illumination Engineering**, Nova York, v. 10, n. 37, p.707-726, 1942.

MOORE, F. **Concepts and practice of architectural daylighting**. Melborne: Van Nostrand Reinhold, 1991.

MORAES, O. B. de. **Método de análise de dados para avaliação de áreas urbanas recuperadas**: Uma abordagem utilizando a lógica fuzzy. 2008. 304 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MOTA, J. F. **Um estudo de caso para a determinação do preço de venda de imóveis urbanos via redes neurais artificiais e métodos estatísticos multivariados**. 2007. 86 f. Tese (Doutorado) - Curso de Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MUNEER, T. **Solar radiation and daylight models**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2004.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful Daylight Illuminances: a replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, Londres, v. 38, n. 7, p. 905-913, 2006.

NASROLLAHI, N.; SHOKRI, E. Daylight illuminance in urban environments for visual comfort and energy performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 66, p. 861-874, 2016.

NASCIMENTO, D. S. C. **Obtenção de Zona de Conforto utilizando redes neurais artificiais**. 2016. 153 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

NETTO, A. R. A. **Melhoria no desempenho lumínico e energético de edifícios com prateleiras de luz**. 2015. 151p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2015.

NEZAMDOOST, A.; WYMELENBERG, K. D. A daylighting field study using human feedback and simulations to test and improve recently adopted annual daylight performance metrics. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 10, n. 5-6, p.471-483, 2017.

OLIVEIRA, F.; BITTENCOURT, L. S.; DÓRIA, D. R. S. Aplicação de uma ferramenta BIM de simulação de desempenho energético nas fases iniciais de projeto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 2, 2019, Campinas. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2019.

OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, R. R. Treinamento de operários de obras: análise estatística da transferência de conhecimento. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 6, n. 4, 2015. p. 304-316.

OLIVEIRA, L. P.; ROMERO, M. B.; Reflexões sobre a relação W/H. Considerações sobre a altura, espaçamento e profundidade das edificações na malha urbana e suas consequências. In: ENCAC - ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007, Ouro Preto. **Anais [...]**. Ouro Preto: ANTAC, 2007, p. 358-366.

OAKLEY, G.; RIFFAT, S. B.; SHAO, L. Daylight performance of lightpipes. **Solar Energy**, v. 69, n. 2, p. 89-98, 2000.

OKE, T.R. Canyon Geometry and the Nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations, **Journal of Climatology**, New York, v.1, n. 3, 1981. p. 237-254.

_____. **Boundary Layer Climates**. 2 ed. Routledge: Londres. 1987.

PASSOS, I. C. S.; LAMENHA, M. A.; CABÚS, R. C. Análise comparativa entre desempenho luminoso e eficiência energética utilizando o Troplux. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2014, p. 53-62. **Anais [...]**. São Paulo: ANTAC, 2014.

PATTINI, A. Recomendaciones de niveles de iluminación en edificios no residenciales.: una comparación internacional. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, Buenos Aires, v. 4, n. 1, p.1-13, 2000.

PEREIRA, D. C. L. **Modelos físicos reduzidos: uma ferramenta para a avaliação da iluminação natural**. 2006. 245p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

_____. **Iluminação Natural em Edifícios de Escritório: metodologia para a avaliação do desempenho luminoso**. 2017. 263p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution: Preliminary configuration and validation. **Solar Energy**, v. 50, n. 3, p.23, 1993.

PERONATO, G.; NAULT, E.; CAPPELLETTI, F.; PERON, F. A parametric design-based methodology to visualize building performance at the neighborhood scale. In: BUILDING SIMULATION APPLICATIONS 2015 - 2ND IBPSA-ITALY CONFERENCE, 2., 2015, Bolzano-bozen. **Anais [...]**. Bolzano-Bozen: IBPSA, 2015. p. 100 - 108.

PETHERBRIDGE, P. **Meteorological aspects of the daylighting of buildings**. 10. ed. Dublin: Geophysical Bulletin, 1954.

PHILLIPS, D. **Natural light in architecture**. Burlington: Elsevier, 2004. p 227.

PLEIJEL, G. **The computation of natural radiation in architecture and town planning**. Gotenburgo: Namnd Byggnadsforskning, 1954.

RAMOS, G.; GHISI, E. Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus programme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 1948-1958, 2010.

RANGEL, P. A.; FORMOSO, C. T.; MIRON, L. I. G.; ECHEVESTRE, M. E. S. Método para a avaliação técnica da qualidade pós-ocupação de áreas de uso comum de habitações de interesse social. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 1, p. 171-194, 2020.

RAKHA, T.; NASSAR, K. Genetic algorithms for ceiling form optimization in response to daylight levels. **Renewable Energy**, Londres, v. 36, n. 9, p. 2348-2356, 2011.

RATTI, C.; BAKER, N.; STEEMERS, K. Energy consumption and urban texture. **Energy and buildings**, v. 37, p. 762-776, 2005.

REINHART, C. F. **Effects of office design on the annual daylight availability: a simulation study**. Ottawa: National Research Council Canada, 2001.

_____. Effects of interior design on the daylight availability in open plan offices. In: PROCEEDINGS OF THE 2002 ACEEE SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS, 3., 2002, Washington. **Anais [...]**. Washington: American Council for An Energy Efficient Economy, 2002. p. 257 - 298.

_____. **Tutorial on the use of Daysim simulations for sustainable design**. Cambridge: Harvard University, 2010.

REINHART, C. F.; ANDERSEN, M. Development and validation of a radiance model for a translucent panel. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 890-904, 2006.

REINHART, C.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. **Leukos**, Ottawa, v. 3, n. 1, p. 7-31, 2006.

REINHART, C. F.; VOSS, K.; WAGNER, A.; LOEHNERT, G. Lean buildings: energy efficient commercial buildings in Germany. In: EFFICIENCY & SUSTAINABILITY - 2000 ACEEE SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS, 3., 2000, Pacific Grove. **Anais [...]**. Pacific Grove: ACEEE, 2000. p. 3287 - 3298.

REINHART, C.; WALKENHORST, O. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. **Energy and Buildings**, Freiburg, v. 33, n. 1, p. 683-697, 2001.

RIBEIRO, P. V. S.; CABÚS, R. C. Análise da influência da malha de pontos em índices de avaliação de desempenho da luz natural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 317-333, 2019.

ROBBINS, C. L. **Daylighting design and analysis**. Nova York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986.

ROGERS, Z. **Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool**. Boulder: Architectural Energy Corporation, 2006.

ROSSETI, K. A. C.; RONDON, C. E.; JORGE, A.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; FRANCO, F. M. Análise estatística dos valores dos níveis de iluminância obtidos por simulação e medidos in loco: estudo de caso em habitações populares no município de Cuiabá-MT. In: ENCAC – ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E ELACAC – ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., 2010, Canela. **Anais [...]**. Canela: ANTAC, 2010. p. 1-9.

ROUSSEEUW, P. J.; LEROY, A. M. **Robust regression and outlier detection**. Nova York: John Wiley & Sons, 1987. 331 p.

SANTOS, I. G.; AUER, T.; SOUZA, R. V. G. Optimized indoor daylight for tropical dense urban environments. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 87-102, 2017.

SANTOS, R. M. **Estado da arte e história da pesquisa em educação estatística em programas brasileiros de pós-graduação**. 2015. 348 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2015.

SCHULTZ, D. P.; SCHULTZ, S. E. **História da psicologia moderna**. 16. ed. São Paulo: Cultrix, 1992. 439 p.

SIEGEL, R.; HOWELL, J. R. **Thermal radiation heat transfer: radiation transfer with absorbing, emitting, and scattering media**. Washington: Scientific and Technical Information Office of National Aeronautics and Space Administration (NASA), 1971. 372 p.

SILVA, M.; QUEIROZ, G. H. M.; PEREIRA, J. V. Estimativa da Disponibilidade de Luz Natural e do Padrão de Céu na Região Amazônica: macapá-ap. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Antac, 2019. p. 1-11.

SIQUEIRA, A. L. **Uso de transformação em análise de variância e análise de regressão**. São Paulo - SP. 154 p. Tese (Mestrado em Estatística) - Curso de Pós-graduação em Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

SITECO. **Daylight systems for glare-free light and pleasant room atmospheres**. Catalogo de Produtos, Osram: Berlim, 2012.

SLATER, A. I; BOYCE, P. R. Illuminance uniformity on desks: Where is the limit? **Lighting Research & Technology**, Londres, v. 4, n. 22, p.165-174, 1990.

SOTO S. F. J. **Avaliação do desempenho luminoso de duto de luz: estudo da implementação em ambientes padrões de habitações populares em três latitudes**. 142 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

SUMPNER, W. E. XII. The diffusion of light. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 35, n. 213, p.81-97, 1893.

SUN, Y.; LIU, D.; FLOR, J.; SHANK, K.; BAIG, H.; WILSON, R.; LIU, H.; SUNDARAM, S.; MALLICK, T. K.; WU, Y. Analysis of the daylight performance of window integrated photovoltaics systems. **Renewable Energy**, v. 145, p. 153-163, 2020.

TAMIOSSO, C. D. P. **Avaliação da Disponibilidade de Iluminação Natural em Salas de Aula de Instituição de Ensino Superior**. 2015. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

TREGENZA, P. R. Mean daylight illuminance in rooms facing sunlit streets. **Building and Environment**, v. 30, n. 1, p. 83-89, 1995.

_____. Sunlight, Skylight and Electric Light. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2., 1993, Florianópolis. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 1993.

_____. Modification of the split-flux formulae for mean daylight factor and internal reflected component with large external obstructions. **Lighting Research & Technology**, v. 21, n. 3, p.125-128, 1989.

_____. The Monte Carlo method in lighting calculations. **Lighting Research & Technology**, v. 15, n. 4, p. 163-170, 1983.

TREGENZA, P. R.; SHARPLES, S. **Daylight algorithms**. Sheffield: Universidade de Sheffield, 1993.

TREGENZA, P. R.; WATERS, I. M. Daylight coefficients. **Lighting Research & Technology**, v.15, n.2, p.65-71, 1983.

TREGENZA, P. R.; WILSON, M. **Daylighting: Architecture and lighting design**. Londres: Routledge, 2011. 304 p.

TROTTER, A. P. **Illumination: its distribution and measurements**. Londres: Macmillan, 1911.

TUKEY, J.W. **The problem of multiple comparisons**. Mimeographs Princeton University, Princeton: Nova Jersey, 1953.

TURIK, C.; VIALI, L.; MORAES, J. F. D. de. Análise de atitudes de alunos universitários em relação à estatística por meio da teoria de resposta ao item. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 18, n. 1, p. 231-243, 2012.

VASCONCELLOS, L. T. de M. **Luz natural e latitude**: a influência da localização geográfica no desempenho luminoso de projeto padrão de sala de aula. 2019. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

VOSS, K.; REINHART, C.F.; LÖHNERT, G.; WAGNER, A. Towards lean buildings: examples and experience from a German demonstration program for energy efficiency and solar energy use in commercial buildings. In: ISES EUROPE SOLAR CONGRESS, 3., 2000, Freiburg. **Anais** [...]. Freiburg: ISES, 2000. p. 38 - 46.

WALSH, J. W. T. **The science of daylight**. Londres: MacDonald, 1961.

ZAMBRANO, L. M. A.; CASTRO, E. B. P.; GOMES, F.; MARQUES, A. C.; BASTOS, P. K. X.; MACHADO, E.; FONTES, P.; CABRAL, M. C.; SANTOS, C. V. M.; CARVALHO, D. A. Simulação física em heliodon computadorizado no ensino da concepção arquitetônica bioclimática. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. **Anais** [...], 2014. p. 253-262.

ZANLORENZI, H. C. P.; SILVA FILHO, D. F. O uso de barreiras vegetais para controle dos ventos em espaços abertos. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, São Paulo, v. 2, n. 10, p. 112-124, abr. 2020.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Artigo 1 publicado nos anais do ENTAC 2020



Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

ESTATÍSTICA E CONFORTO AMBIENTAL: LEVANTAMENTO DO USO EM ARTIGOS SOBRE ILUMINAÇÃO NATURAL NO ENCAC/ENTAC 2009-2019

**RIBEIRO, Pedro Vitor Sousa (1); RIBEIRO, Angélica Dória (2); RODRIGUES,
Juliana de Paula Valente (3); CARVALHO FILHO, Gilson (4); CABÚS, Ricardo
Carvalho (5)¹**

- (1) Universidade Federal de Sergipe, pedrovrsibeiro@gmail.com
(2) Universidade Federal de Sergipe, ange_doria@hotmail.com
(3) Universidade Federal de Sergipe, julianapaulavalente@gmail.com
(4) Universidade Federal de Alagoas, gilson.filho@ctec.ufal.br
(5) Universidade Federal de Alagoas, r.cabus@ctec.ufal.br

RESUMO

A utilização de ferramentas de estatística na análise de dados em estudos na área de conforto ambiental, ainda é algo pouco comum, mesmo tendo sido amplamente utilizada na elaboração de métodos experimentais e softwares. O artigo tem o objetivo de levantar a ocorrência da utilização de ferramentas de estatística em publicações nacionais na área de conforto luminoso, com ênfase na iluminação natural. Foram escolhidos os artigos de dois eventos da área de conforto ambiental, o ENCAC e o ENTAC, no período entre 2009 e 2019. Para cada artigo foi definido um índice denominado de potencial do uso de estatística, baseando-se nas variações de parâmetros de simulação ou de medição, para fins de comparação. Foram analisados um total de 233 artigos. Observa-se que há a crescente presença de pesquisas que se utilizam de simulação computacional, também de forma associada à medição. O uso da estatística ainda é baixo, perto dos 22%, enquanto que mais de 80% dos trabalhos possuem potencial de uso. Conclui-se que a utilização de tais ferramentas de análises de dados ainda é muito restrita, mas com grande potencial de uso.

Palavras-chave: Estatística. Conforto ambiental. Iluminação natural.

ABSTRACT

The use of statistical tools in data analysis in studies in the area of environmental comfort is still somewhat unusual, even though it has been widely used in the elaboration of several experimental methods and software. The article aims to raise the occurrence of the use of statistical tools in national publications in the area of luminous comfort, with emphasis on daylighting. The articles of two events in the area of environmental comfort, the ENCAC and ENTAC, were chosen for the period between 2009 and 2019. For each article, an index called potential use of statistics was defined, based on the variations of simulation or measurement

¹ RIBEIRO, Pedro Vitor Sousa; RIBEIRO, Angélica Dória; RODRIGUES, Juliana de Paula Valente; CARVALHO FILHO, Gilson; CABÚS, Ricardo Carvalho. Estatística e conforto ambiental: Levantamento do uso em artigos sobre iluminação natural no ENCAC/ENTAC 2009-2019. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUIDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

parameters, for comparison purposes. A total of 233 articles were analyzed. It can be observed that there is a growing presence of research using computer simulation, also associated with measurement. The use of statistics is still low, close to 22%, while more than 80% of the papers have potential for use. It is concluded that the use of such data analysis tools is still very restricted, but with great potential of use.

Keywords: Statistics. Environmental comfort. Daylighting.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação de parâmetros de conforto em arquitetura comumente utiliza a análise exploratória de resultados como método de estudo, com a elaboração de tabelas e gráficos. Tais dados podem ser de dois tipos: métricos e não métricos. Para o primeiro atribui-se a valores identificados em diferentes quantidades ou graus, como distância, volume e massa; enquanto que os não métricos indicam a presença de um atributo, mas não sua quantia (HAIR *et al.*, 1995). O aprofundamento do uso de ferramentas estatísticas e da lógica nas análises, independentemente do tipo de dado, é essencial para orientar a construção do comportamento do objeto e a interpretação de seus resultados (RAMOS, 2013).

O uso da probabilidade e da estatística aplicadas à avaliação do conforto de usuários não é recente. Autores como Olgyay (1963) e Givoni (1969, 1992) utilizaram um banco de dados de estudos em diversos países para compor suas cartas bioclimáticas. Na mesma década, Fanger (1970) desenvolveu a equação do conforto térmico, para previsão da sensação térmica esperada por uma pessoa "média" no interior de uma edificação. O autor determinou duas grandezas (*Predicted Percentage of Dissatisfied* – PPD e *Predicted Mean Vote* – PMV) mensuráveis e calculadas por equações que foram geradas por métodos de regressão multivariada.

Na área de iluminação natural observa-se que o uso da estatística também não é recente. Desde a elaboração dos métodos de cálculo do fator de luz do dia, passando pela modelagem de céus artificiais (CIE, 2002; PEREZ, SEALS, MICHALSKY, 1993) até o desenvolvimento de softwares de simulação em iluminação natural (CABUS, 2005). Mesmo diante de tal cenário, a utilização de tais ferramentas na análise de resultados de simulação computacional e de medição ainda é restrita.

Recentemente técnicas de estatística avançada têm sido aplicadas nos estudos ligados à arquitetura, como a estatística multivariada (AMOLE, 2009; MOTA, 2007), a lógica *Fuzzy* (MORAES, 2008) e as redes neurais (NASCIMENTO, 2016). Ferramentas simples da estatística continuam sendo aplicadas nas pesquisas em arquitetura, entretanto há uma grande lacuna quando se observa que uma fração pequena dos trabalhos utiliza técnicas avançadas.

A utilização destas ferramentas requer que o estudante e o pesquisador reconheçam sua utilidade, onde docentes e discentes possam favorecer uma visão integrada da estatística, e seu ensino, nos cursos graduação e pós-graduação (TURIK, VIALI E MORAES, 2012). Uma pesquisa desenvolvida por Santos (2015) aponta que os planos de curso de pós graduação não instrumentalizam o professor para trabalhar com os conceitos de probabilidade e estatística, tendo em vista que são pouco abordados nas grades curriculares nacionais.

Baseado na grande aplicabilidade das ferramentas de probabilidade e estatística nas pesquisas em arquitetura, especificamente na área de conforto ambiental, o presente artigo tem como objetivo levantar a ocorrência da utilização de ferramentas de estatística em publicações nacionais na área de conforto luminoso, com ênfase na iluminação natural.

2 METODOLOGIA

A primeira etapa do levantamento consistiu na definição do objeto de estudo e do recorte temporal utilizado. Para o levantamento foram escolhidos dois eventos importantes no cenário da pesquisa em conforto luminoso no Brasil, o ENCAC – Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e o ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Ambos ocorrem de forma bienal, sendo a primeira edição do ENCAC de 1990 e do ENTAC de 1986. Foi escolhido um recorte temporal de dez anos, compreendendo o período entre 2009 e 2019.

Posteriormente foram selecionados os artigos que versam sobre o conforto luminoso, especificamente sobre luz natural, seja de forma exclusiva ou combinada com outro tipo de estudo. Os anais do ENTAC foram obtidos na plataforma InfoHab, no período de janeiro a março de 2020, já os do ENCAC foram obtidos em mídia digital disponibilizada no evento.

Para a fase de levantamento foi elaborada uma planilha preenchida após a leitura dos artigos. A planilha consta de itens referentes à aspectos gerais do artigo, como autores e instituições vinculadas, metodologia empregada no artigo, caracterização e/ou recursos de cada instrumento metodológico utilizado e forma de apresentação dos resultados, finalizando com aqueles relativos à análise estatística de dados. No total foram preenchidos 98 campos, cuja síntese é apresentada no quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros analisados nos artigos, apresentados de forma esquemática.

Evento					
Nome	Ano				
Autores					
Quantidade	Formação	Estado	Instituição		
Tipo de Artigo					
Revisão de Literatura		Simulação Computacional		Medição (Real/Modelo)	
Simulação Computacional					
Software	Modelo	Parâmetros e Variações	Métricas de Análises dos Resultados	Forma de Apresentação dos Resultados	Análise Estatística e Ferramentas Estatísticas
Medição (In Loco ou Modelo)					
Ferramentas de obtenção de dados		Parâmetros e Variações	Métricas de Análises dos Resultados	Forma de Apresentação dos Resultados	Análise Estatística e Ferramentas Estatísticas

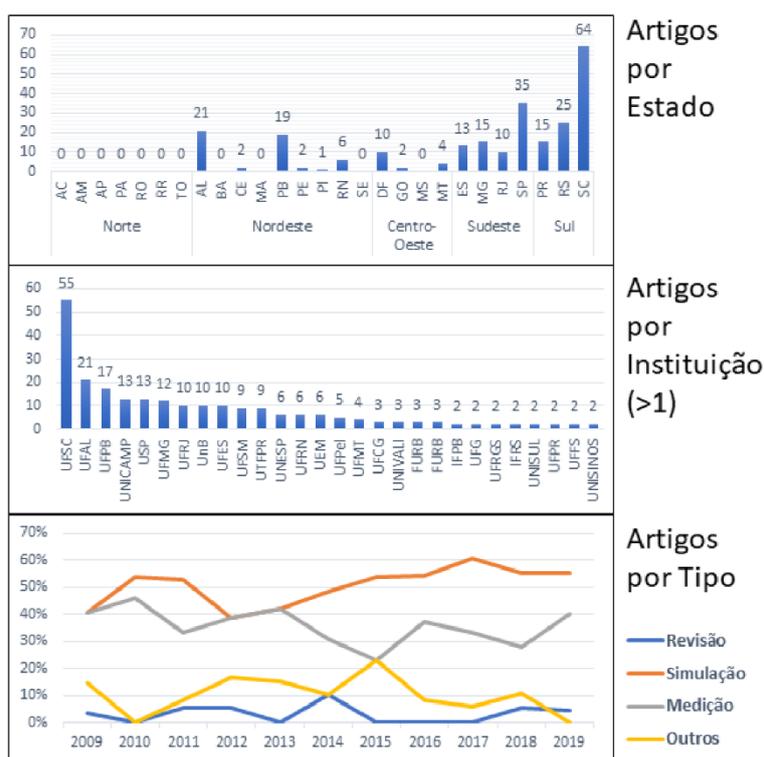
As métricas de análises dos resultados verificadas no levantamento foram: Iluminância média (E), Fator de Luz do Dia (FLD), Uniformidade (U), Autonomia de Luz Natural Simples (ALN) e espacial (ALNe), Iluminância Útil de Luz Natural (IULN) e Exposição Solar Anual (ESA). Foram classificadas em Outras aquelas relativas à estudos de ofuscamento, como Luminância, *Daylight Glare Probability* (DGP) e *Daylight Glare Index* (DGI).

Os resultados foram analisados de forma exploratória, por meio de gráficos e tabelas. Foi definido um índice para cada artigo, denominado de potencial de uso da estatística, calculado a partir das respostas obtidas na coleta de dados. Caso a pesquisa possua processamento de dados anual, mais de duas variações de modelo, de parâmetro geométrico, ou de parâmetro de processamento, é admitido que ele possui potencial para uso de ferramentas de estatística na análise de dados. O índice foi calculado a fim de comparação com o uso encontrado no levantamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente são apresentados os resultados referentes às características gerais dos artigos, vistos na figura 1. Depois da fase de classificação foram separados um total de 233 artigos que abordam a iluminação natural, seja de forma exclusiva ou combinada com análises de iluminação artificial e conforto térmico. Observa-se que a maior parte das publicações se concentra no eixo sul-sudeste (73%), com algumas publicações do nordeste (21%) e centro-oeste (6%) e nenhuma da região norte. A maior parte das publicações vem de universidades federais e estaduais (72%), sendo que a que mais possui publicações no período estudado é a UFSC (20%), da região sul, seguida da UFAL (8%), da região nordeste.

Figura 1 – Resultados de artigos por estado, por instituição e por tipo.

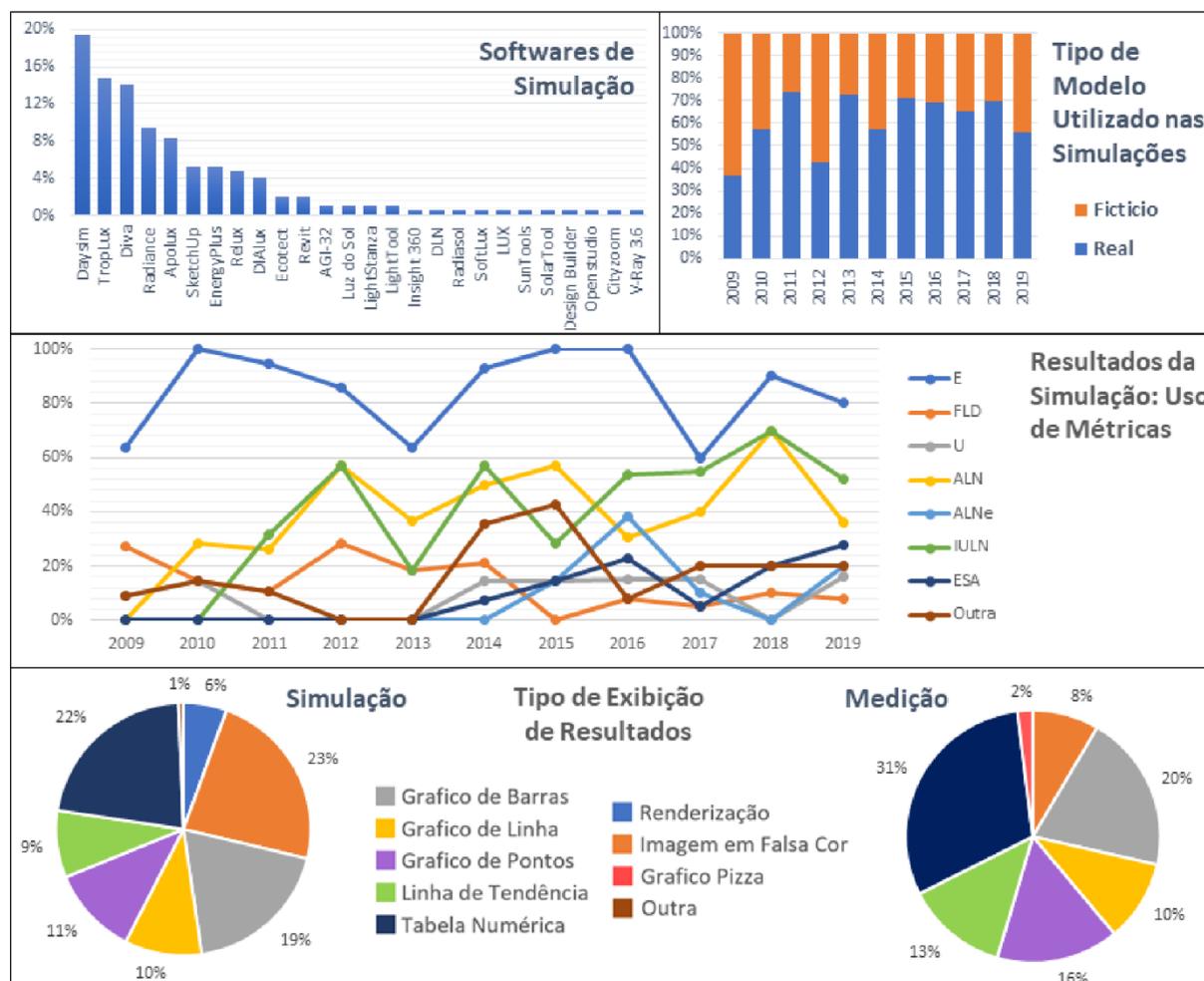


Quando analisados os tipos de artigos publicados, em 51% é abordada a Simulação computacional, 36% a medição, in loco ou em modelo, 4% a revisão de literatura e 9% classificados em outros estudos, como a utilização de métodos preditivos e de avaliações com normativos de certificação. É possível perceber também um aumento gradual no número de artigos que utilizam simulação computacional, acompanhado de uma redução nos de medição em modelos. As pesquisas que se utilizam de simulação, seja de forma única, ou de forma combinada com a medição sempre possuem maior número de publicações para o período estudado.

A figura 2 apresenta os resultados específicos para os dois principais tipos de pesquisas. Nas pesquisas que utilizam simulação computacional há grande variedade de softwares utilizados, sendo o mais utilizado em todos os trabalhos o Daysim (19%), seguido pelo TropLux (15%) e pelo plugin Diva-for-Rhino (14%). É importante destacar que entre os cinco softwares mais utilizados, dois são desenvolvidos no Brasil, o TropLux (CABUS, 2005) e o Apolux (CLARO, 1998), e que a utilização do plugin Diva-for-Rhino tem aumentado de forma significativa, principalmente nos últimos dois anos de pesquisa. Tais softwares permitem a aquisição

de grande volume de dados, o que viabiliza a utilização de ferramentas da estatística na análise dos resultados.

Figura 2 – Resultados obtidos para os artigos do tipo simulação computacional e medição, in loco ou em modelos



Para os modelos utilizados em simulação observa-se que há uma tendência de utilização de modelos computacionais baseados em parâmetros reais, ou em situações reais, e que os modelos em cenários totalmente hipotéticos têm tido cada vez menos uso. Observou-se também a adoção crescente de variáveis de entorno, como obstruções e vegetação. As simulações em que o modelo computacional tem como base um modelo real existente, ou de cenário urbano provável, é sempre maior que o outro tipo de modelo, totalmente fictício.

Quando analisados os tipos de métricas utilizadas na análise dos resultados por simulação observa-se que a iluminância é o parâmetro sempre presente, seguida da autonomia de luz natural (ALN) e da iluminância útil de luz natural (IULN). O fator de luz do dia (FLD) é uma métrica que vem caindo em desuso nas pesquisas, sendo substituída por outras métricas mais eficientes e de estudo anualizado, como é o caso da autonomia de luz natural espacial (ALNe).

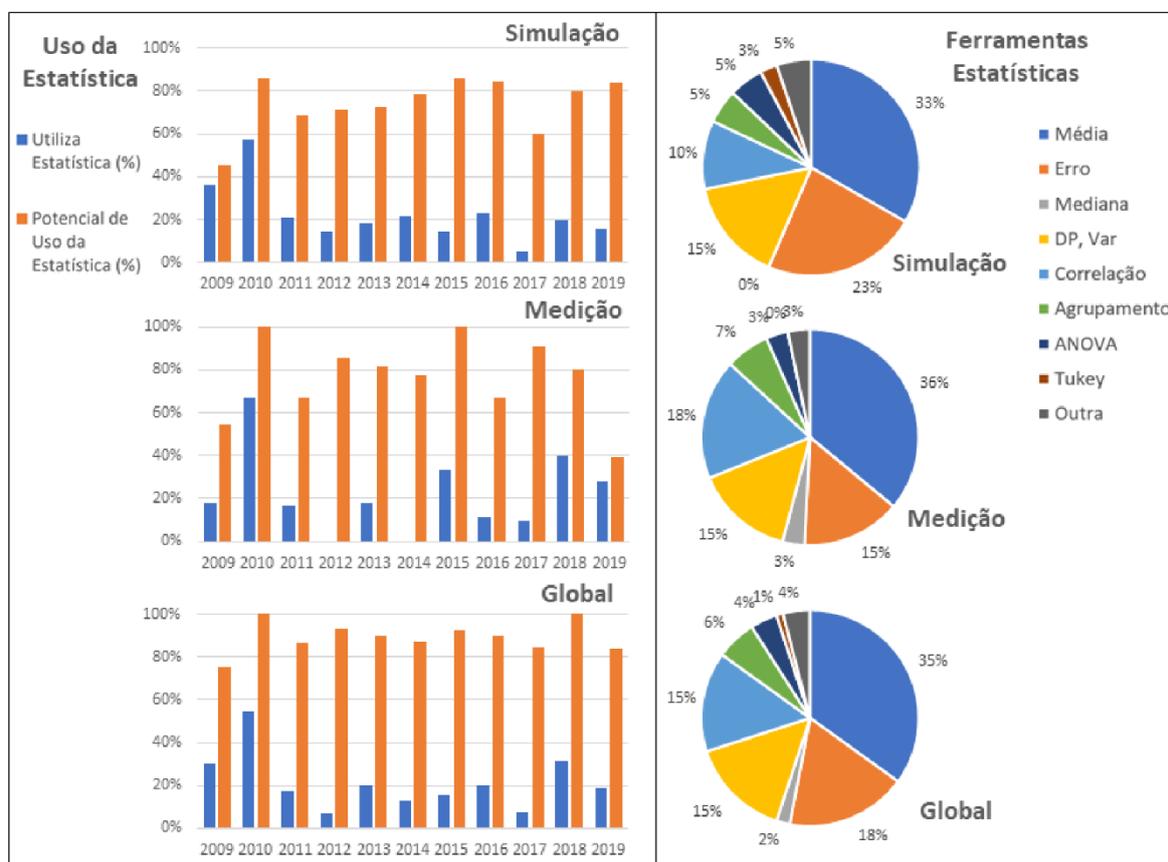
Quando analisada a forma de exibição dos resultados observa-se que há grande ocorrência da utilização de imagens em falsa cor (23%) e de renderização de imagens (22%), seja do ponto de vista do observador, no caso de estudos de ofuscamento, ou de curvas de isoiluminância no plano de trabalho. Há também grande ocorrência de resultados em forma de gráficos de barras e tabelas

numéricas, essa última sendo cada vez menos utilizada. Observou-se a ocorrência, em alguns estudos, da utilização de gráficos de pontos com linha de tendência, entretanto todas elas de forma ilustrativa, sem utilizar nenhuma forma de regressão ou análise de correlação no gráfico.

Para os estudos de medição a quantidade de ferramentas e formas de apresentação dos resultados é bem maior que na simulação, entretanto a apresentação dos resultados apresenta as mesmas variáveis possíveis, exceto a renderização. Na maioria dos casos de medição os resultados são apresentados na forma de tabelas numéricas (31%) por vezes acompanhada de gráficos de barra ou pontos. É possível observar a maior utilização de gráficos de pontos com linha de tendência que nos resultados de pesquisas com simulação computacional.

Como objetivo do levantamento, a última etapa foi a verificação do uso das ferramentas de estatística na pesquisa em iluminação natural, cujos resultados são apresentados na figura 3. Foi possível verificar que, em média, 22% dos trabalhos utilizam ferramentas de estatística na apresentação e análise dos resultados. Mesmo sendo um percentual baixo, observa-se que a maior parte das ocorrências são no cálculo de médias, desvio padrão, variância e erro percentual, somando 70% das ocorrências. O restante utiliza ferramentas avançadas como as análises de correlação, agrupamento e ANOVA, com ou sem os testes de hipóteses associados. É importante destacar que a utilização de ferramentas avançadas de estatística é mais presente nos estudos do tipo medição do que nos de simulação computacional. Tendo em vista que o volume de dados que a simulação computacional permite obter é significativamente maior que os de medição, o uso das ferramentas estatísticas de análises deveria ser maior em tais casos, o que não foi observado.

Figura 3 – Uso e potencial de uso da estatística nas pesquisas de simulação computacional e medição.



Quando analisado o potencial do uso de estatística na pesquisa observa-se que seu valor é sempre alto, próximo à 80%. A utilização de novas métricas de avaliação do desempenho da luz natural, bem como a maior quantidade de processamento anualizados, tem como consequência um maior volume de dados, fazendo com que o potencial seja cada vez maior. Mesmo com a facilidade de uso das métricas anualizadas, ainda é possível encontrar estudos que se limitam a verificar a disponibilidade de luz natural em solstícios e equinócios, o que tem sido cada vez menos observado. Mesmo diante do aumento no volume de dados e de simulações o uso da estatística não acompanha esse comportamento, mantendo-se sempre em torno de 20%, o que indica que apenas 25% dos artigos com potencial de uso de estatística realmente a utilizam.

Para os estudos de medição in loco ou em modelo observa-se uma tendência de aumento no uso de ferramentas de estatística acompanhada da redução no potencial de uso ao longo dos anos. Esse comportamento pode ser explicado pela maior quantidade de pesquisas que fazem os dois tipos de análises, simulação e medição, e que se utilizam de índices como erro, média e desvio padrão para comparação de resultados.

4 CONCLUSÕES

Diante dos dados obtidos é possível observar que o uso da estatística nos trabalhos publicados nos anais do ENCAC e ENTAC no período de 2009 a 2019, especificamente aqueles que versam sobre iluminação natural, é pequeno. Apenas 22% dos trabalhos, em média, utilizam-na, enquanto mais de 80% deles possuem potencial para utilizá-la, tendo em vista as variações adotadas em seus estudos, entretanto, em média, apenas 25% deles a utilizam. A utilização de gráficos, principalmente de barra, de forma sintetizar os resultados, poderia ser simplificada pela adoção de ferramentas da estatística.

Não foi possível identificar a causa da pouca utilização, entretanto observou-se que as análises que empregam ferramentas visuais, como renderizações e imagens em falsa cor, são frequentes. A forma de apresentação de resultados utilizando tais ferramentas, visuais e de fácil compreensão, quando comparadas aos resultados obtidos pela estatística, que comumente são tabelas numéricas, o que talvez justifique sua pouca utilização.

A utilização de novas métricas de avaliação do desempenho da luz natural, que preveem estudos anualizados, faz com que o volume de dados fornecidos pelos softwares de simulação seja cada vez maior, entretanto esse aumento não é acompanhado do aumento no uso da estatística como ferramenta de análise dos resultados. Outra questão importante é que mesmo com uso de tais métricas anualizadas, ainda é possível encontrar pesquisas limitadas ao estudo em dias de solstícios e equinócios, prática comum quando a capacidade de processamento dos computadores não permitia o estudo anualizado, mas que atualmente não se justifica, seja pelo desempenho dos softwares de simulação, seja pelas métricas anualizadas.

O estudo identifica grande potencial no uso de ferramentas da probabilidade e estatística nos estudos em iluminação natural para as pesquisas avaliadas, entretanto é importante que pesquisadores, docentes e discentes estejam familiarizados com seu uso e vislumbrem possibilidades de melhoria em suas análises com a aplicação de tais ferramentas.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Pesquisa em Iluminação da Universidade Federal de Alagoas pela participação e colaboração na fase de levantamento de dados.

REFERÊNCIAS

- AMOLE, D. Residential satisfaction in students' housing. **Journal of Environmental Psychology**, v. 29, n. 1, p.76-85, mar. 2009.
- CABÚS, R. C. TropLux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações. In: Encontro Latino-Americano, 4., Encontro Nacional Sobre Conforto No Ambiente Construído, 8., 2005, Maceió, **Anais[...]** Porto Alegre: Antac, p. 240 - 249, 2005. 1 CD-ROM.
- CIE - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **Spatial distribution of daylight** - CIE standard general sky. Viena: CIE. (CIE DS 011.2/E:2002). 2002.
- FANGER, P. O. **Thermal Comfort**. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- GIVONI, B. (1992): Comfort, climate analysis and building design guidelines, **Energy and Buildings**, v. 18 pp. 11-23.
- GIVONI, B. **L'homme, L'architecture et le Climat**. Paris: Le Moniteur, 1968.
- HAIR, J.F., WILLIAM C. B., BARRY J. B., ROLPH E. A., RONALD L. T. **Multivariate data analysis** (with readings). 4. ed. Prentice Hall: Ellgwood Cliffs, 1995. 475p.
- MORAES, O. B. de. **Método de análise de dados para avaliação de áreas urbanas recuperadas: Uma abordagem utilizando a lógica fuzzy**. 2008. 304 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- MOTA, J. F. da. **Um estudo de caso para a determinação do preço de venda de imóveis urbanos via redes neurais artificiais e métodos estatísticos multivariados**. 2007. 86 f. Tese (Doutorado) - Curso de Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- NASCIMENTO, D. de S. C. **Obtenção de Zona de Conforto utilizando redes neurais artificiais**. 2016. 153 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016
- OLGYAY, V.; OLGAYAY, A. **Design with climate**. Princeton University Press, Princeton. 1963.
- PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation. **Solar Energy**, v. 50, n. 3, p.235-245, mar. 1993.
- RAMOS, M. P. Métodos Quantitativos e Pesquisa em Ciências Sociais: lógica e utilidade do uso da quantificação nas explicações dos fenômenos sociais. : Lógica e Utilidade do Uso da Quantificação nas Explicações dos Fenômenos Sociais. **Mediações - Revista de Ciências Sociais**, v. 18, n. 1, p. 55, 23 set. 2013.
- SANTOS, R. M. dos. **Estado da arte e história da pesquisa em educação estatística em programas brasileiros de pós-graduação**. 2015. 348 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação, Campinas, SP, 2015.
- TURIK, C.; VIALI, L.; MORAES, J. F. D. de. Análise de atitudes de alunos universitários em relação à estatística por meio da teoria de resposta ao item. **Ciência & Educação (bauru)**, v. 18, n. 1, p. 231-243, 2012.

APÊNDICE 2 - Artigo 2 publicado na revista Ambiente Construído com os resultados da fase 1 do estudo

Análise da influência da malha de pontos em índices de avaliação de desempenho da luz natural

Analysis of grid of points influence on daylight metrics

Pedro Vitor Sousa Ribeiro
Ricardo Carvalho Cabús

Resumo

O desempenho da iluminação natural de ambientes pode ser avaliado por meio de várias ferramentas, a maioria baseada na iluminância. Mesmo com os avanços nas últimas décadas, principalmente os computacionais, a definição dos pontos da malha é deixada, em geral, para escolha do simulador. Este artigo tem como objetivo analisar a influência da malha de pontos no desempenho das métricas: iluminância média (E_m), uniformidade (U), autonomia de luz natural (ALN), autonomia de luz natural contínua ($ALNc$), autonomia de luz natural espacial ($ALNe$), iluminância útil de luz natural ($IULN$) e exposição solar anual (ESA). A simulação computacional foi realizada pelo TropLux, em ambiente de $6\text{ m}^2 \times 6\text{ m}^2$ sem proteção solar. Realizou-se análise exploratória e estatística, utilizando a ANOVA, teste de Tukey e matriz de correlação. Os resultados indicam que a grade de pontos influencia na precisão das métricas estudadas. Para E_m , U , ALN , $ALNc$, $ALNe$ e $IULN$ os resultados se estabilizaram a partir de uma malha de 6×6 pontos, com distância entre pontos de 1,00 m, enquanto para ESA ocorreu a partir da malha de 11×11 pontos, ou distância entre pontos de 0,54 m. O trabalho sugere que uma análise distinta das contribuições da luz do sol direta e da luz do céu levando em consideração o tamanho da malha pode otimizar o desempenho computacional, mantendo a precisão.

Palavras-chave: Iluminação natural. Malha de pontos. Índices de desempenho da luz natural. Simulação computacional.

Abstract

The luminous performance of buildings can be evaluated using several tools, most of them based on illuminance. Although progress has been made in daylight metrics in recent decades, mainly due to developments in computer systems technology, they do not usually address how grids are defined. This paper analyses the influence of the grid influence on the performance of the following metrics: average illuminance (E_m), uniformity (U), daylight autonomy (DA), continuous daylight autonomy (cDA), spatial daylight autonomy (sDA), useful daylight illuminance (UDI) and annual solar exposure (ASE). Daylight simulations were done using TropLux, in a $6 \times 6\text{ m}^2$ room without shading device. Exploratory and statistical analyses were performed using the ANOVA method, Tukey tests and a correlation matrix. The results indicate that the grid of points influences on the precision of the studied metrics. For E_m , U , DA , cDA , sDA and UDI , the results stabilised starting from a 6×6 grid with a 1,00m distance between points. For ASE , a grid with 11×11 points, or a 0.54 m distance between points was required. This study suggests that a different analysis of skylight and direct sunlight, taking into account grid size, may optimise computer performance maintaining accuracy.

¹Pedro Vitor Sousa Ribeiro

¹Universidade Federal de Alagoas
Maceió - AL - Brasil
<https://orcid.org/0000-0003-0152-4319>

²Ricardo Carvalho Cabús

²Universidade Federal de Alagoas
Maceió - AL - Brasil

Recebido em 19/11/18

Aceito em 07/03/19

Keywords: Daylighting. Grid of points. Daylight metrics. Computer simulation.

Introdução

A avaliação do desempenho luminoso de um ambiente pode ser feita utilizando diversas ferramentas como simulação computacional ou por meio de medição *in loco*. O avanço na velocidade de processamento e a facilidade de utilização e acesso aos computadores pessoais têm determinado o aumento da frequência de uso dessa ferramenta, no estudo da iluminação natural de edificações. Definidos os parâmetros de processamento e a geometria do modelo de estudo, os softwares de simulação em iluminação natural fornecem resultados por imagens ou por dados numéricos.

Alguns índices podem ser utilizados para determinar a qualidade da iluminação natural dos ambientes. A maioria deles utiliza, em seu cálculo, a iluminância como valor-base. O trabalho utiliza os índices apenas como ferramenta de comparação, não sendo eles, ou a sua forma de cálculo, objeto de estudo. Os índices são detalhados a seguir.

Iluminância média (Em)

A iluminância é a ferramenta mais simples de análise do desempenho luminoso de um ambiente. A norma brasileira NBR 15215: Iluminação Natural (ANBT, 2005a, 2005b, 2005c) utiliza a iluminância como parâmetro de avaliação da disponibilidade de luz natural em ambientes construídos. Aponta, ainda, os procedimentos para sua medição *in loco* ou por meio de simulação, utilizando um método gráfico.

Outra norma que prevê a determinação da iluminância é a NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013a), por meio de simulação ou de medições *in loco*. Entretanto, Guidi *et al.* (2018) observam que o procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural descrito não configura uma simulação computacional, e sim um método prescritivo. Normas de iluminação artificial, como a ISO/CIE 8995-1: Iluminação de Ambientes de Trabalho (ABNT, 2013b), adotam esse índice como parâmetro referência para a avaliação de desempenho luminoso de ambientes internos. No trabalho foi usada a iluminância média do plano de trabalho de forma a simplificar a análise comparativa.

Uniformidade da iluminância (U)

A CIBSE (CHARTERED..., 1999) aponta que o uso da iluminância média como único parâmetro de avaliação não é efetivo para a verificação da qualidade da iluminação, sendo necessária a utilização de outros instrumentos, como a uniformidade. Alguns relatórios técnicos, como a

CEC-500-06-039 (CALIFORNIA..., 2012), e alguns autores (LITTLEFAIR; AIZLEWOOD; BIRTLES, 1994; RAKHA; NASSAR, 2011; MANGKUTO; ROHMAH; ASRI, 2016) afirmam que o conceito de uniformidade pode ser ampliado para utilização em iluminação natural.

A uniformidade da iluminância é a razão entre seu valor mínimo e a média no plano de trabalho (ABNT, 2013b). Autores como Baker, Fanchiotti e Steemers (1993) apontam-na como uma das componentes indispensáveis na avaliação da qualidade da iluminação natural. Phillips (2004) afirma que o aumento da uniformidade deve anteceder outras preocupações como a ocorrência de ofuscamento. Esse parâmetro permite avaliar a relação entre a quantidade de luz na área da tarefa e o seu entorno imediato, proporcionando melhoria na avaliação da iluminância, se comparado apenas ao valor médio global (SLATER; BOYCE, 1990). O ganho em uniformidade da iluminância está associado à utilização de dispositivos de controle da luz natural. Elementos como o brise e a prateleira de luz são utilizados com essa finalidade. No presente estudo não foram adotados tais elementos.

Autores como Slater e Boyce (1990) afirmam, para iluminação artificial, que a adoção do valor 0,7 de uniformidade no plano da tarefa é satisfatório em todas as atividades. Mangkuto, Rohmah e Asri (2016) aponta que para a adoção do conceito de uniformidade em iluminação natural faz-se necessário alterar o valor de referência, tendo em vista a variabilidade da fonte.

Autonomia de Luz Natural (ALN)

A ALN foi o primeiro parâmetro de avaliação que anula o estudo da iluminância. Desenvolvido pela *Association Suissedes Electriciens* (ASSOCIATION..., 1989) e aperfeiçoado por Reinhart e Walkenhorst (2001), é definida como o percentual do ano em que um requisito mínimo de iluminância é atingido somente por luz natural. Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) adotam iluminância mínima de 500 lx, que pode ser alterada conforme a necessidade e o uso do ambiente em estudo.

Diversos autores propuseram índices derivados da ALN: autonomia de luz natural contínua (ALNc, ver Figura 1) (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006), autonomia de luz natural temporal (ALNt) (KLEINDIENST; ANDERSEN, 2012), autonomia de luz natural zonal (ILLUMINATING..., 2011) e autonomia de luz natural espacial (ALNe) (ILLUMINATING..., 2011). Em 2012 a *Illuminating Engineering*

Society, tendo como base 61 pesquisas publicadas pela *California Energy Commission* (CALIFORNIA..., 2012), adotou como referencial a ALNe (ILLUMINATING..., 2012). A ALNe é o percentual de área do plano de trabalho em que a ALN é maior ou igual a 50%. O normativo também aponta duas classificações possíveis: favorável ou preferível – quando o percentual de área é maior ou igual a 75% –, e neutro ou aceitável – quando o percentual é maior que 55%.

Iluminância Útil de Luz Natural (IULN)

A IULN, proposta por Nabil e Mardaljevic (2005), consiste em uma análise anualizada da iluminância do ambiente em um ponto, categorizando os valores obtidos em intervalos, conforme apresentados no Quadro 1. O conceito pode ser ampliado espacialmente para uma malha de pontos, resultando na IULN média do plano. Inicialmente, os autores adotaram o valor máximo de 2.000 lx (NABIL; MARDALJEVIC, 2005), ampliando posteriormente para 3.000 lx (MARDALJEVIC *et al.*, 2011).

As faixas definidas pelo índice podem ser alteradas dependendo do uso do ambiente e dos requisitos de iluminação natural desejados. Os autores afirmam que esse conceito poderá substituir o tradicional fator de luz do dia (FLD) (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

Exposição Solar Anual (ESA)

A IES LM-83-12 (ILLUMINATING..., 2012) traz um indicador para avaliar a exposição à luz solar direta, a ESA. Ela avalia, de forma simplificada, o

potencial de desconforto visual causado pela radiação solar direta em ambientes. O cálculo consiste em determinar a quantidade percentual de pontos ou de sensores em que a luz solar direta atinge mais de 1.000 lx em mais de 250 horas/ano (ILLUMINATING..., 2012). O ambiente deve ser avaliado ao longo de um ano, 10 horas por dia. Trabalhos recentes (PEREIRA, 2017; FERNANDEZ, 2017) que utilizam esse indicador comumente não discutem a forma como a quantidade e a disposição dos pontos de análise foram escolhidas.

Para aplicação do índice a IES LM-83-12 (ILLUMINATING..., 2012) prevê a utilização de protetor solar nas janelas, como brises ou persianas, entretanto permite que não sejam utilizados em casos nos quais não são previstos em projeto. Para o estudo não serão utilizados protetores solares nas aberturas.

Malha de sensores e intervalo de tempo

Nos estudos de iluminação natural em ambientes internos (GUIDI *et al.*, 2018; CARVALHO, 2018; ALBUQUERQUE, AMORIM; 2012) observa-se a predominância da escolha da malha de pontos utilizando os parâmetros descritos na NBR 15215-4 (ABNT, 2005c) ou na ISO/CIE 8995-1 (INTERNATIONAL..., 2002). Em outros casos, os autores não informam a origem da escolha da malha (FONTENELLE; CLARO; ARAÚJO, 2011; MAIOLI; ALVAREZ, 2013) ou sequer informam quantos pontos foram utilizados (FONSECA; PEREIRA, 2017; FERNANDEZ, 2017; PEREIRA, 2017).

Figura 1 - Comparação entre os métodos de cálculo para ALN e ALNc



Quadro 1 - Zonas da iluminância útil de luz natural

Intervalo	Classificação	A quantidade de luz natural é:
$E < 100$ lx	Não atinge a faixa útil	Insuficiente como única fonte de iluminação, sendo necessária uma significativa contribuição de iluminação artificial.
100 lx $< E < 500$ lx	Atinge a faixa útil	Efetiva, entretanto, ainda necessitará de complementação artificial
500 lx $< E < 3.000$ lx	Atinge a faixa útil	Desejável
$E > 3.000$ lx	Excede a faixa útil	Excessiva, e pode produzir desconforto visual ou térmico, ou ambos.

Fonte: adaptado de Mardaljevic *et al.* (2011).

No artigo que define a IULN não se encontram menções a requisitos de quantidade de pontos de análise (NABIL; MARDALJEVIC, 2006). Entretanto, em algumas aplicações realizadas para atestar a sua eficácia esses autores utilizaram no máximo um ponto por metro quadrado. Os autores indicaram ainda que o estudo deveria ser anualizado, mas deixam a quantidade de dias e horas de análise a critério do projetista, que deve considerar os períodos de utilização do ambiente.

As normas NBR 15215-4 (ABNT, 2005c) – para luz natural – e a ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013b) – para luz artificial – propõem o cálculo da quantidade de pontos de análise baseado nas dimensões do ambiente, mas apontam que o valor pode ser aumentado para melhor caracterização do ambiente. A norma de desempenho das edificações residenciais NBR 15575 (ABNT, 2013a) exige que o estudo seja feito em um ponto no centro do ambiente, em apenas quatro momentos ao longo do ano, em dois dias e em dois horários.

Ao tratar da quantidade de pontos necessária para o cálculo da ALN, Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) definem que a malha de pontos deverá ter distância máxima de 0,5 m entre os pontos e que densidades maiores podem ser utilizadas em casos particulares. Apontam, ainda, que devem ser utilizadas todas as horas diárias de sol, mesmo que o ambiente não seja usado durante todo o período. Em casos particulares, outros intervalos podem ser utilizados. Autores como Dogan e Park (2018) trabalharam com essa variação temporal e perceberam que há significativa influência no resultado, quando a quantidade de horas de cálculo é alterada.

A LM 83-12 (ILLUMINATING..., 2012) descreve de forma objetiva os requisitos de horas e dias do ano para os índices ESA e ALNe que se realizará em intervalos de uma hora, das 8h às 18h, horário legal, durante todo o ano, totalizando 3.650 horas. Define, ainda, que os pontos devem ter distância máxima de 0,60 m entre si e 0,30 m das paredes. Essa distância máxima foi definida por conseguir “atender adequadamente todas as possibilidades de área de trabalho” (IES, 2012). Os normativos citados adotam como altura do plano de trabalho: 0,75 m (ABNT, 2013a; 2013b), 0,76 m (ILLUMINATING..., 2012) e 0,80 m (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006).

Nesse contexto, faz-se necessário avaliar qual a influência dos parâmetros de cálculo escolhidos para o processamento computacional nos resultados obtidos e, conseqüentemente, na avaliação do desempenho luminoso de ambientes, utilizando os índices previamente descritos.

Este artigo tem como objetivo determinar a influência do tamanho da malha de pontos nos índices de desempenho luminoso: Em, U, ALN, ALNc, ALNe, IULN e ESA.

Método

O método utilizado busca avaliar a relação entre os índices de desempenho da luz natural e sua relação com a definição da malha de pontos de cálculo da iluminância. Os procedimentos e ferramentas utilizadas foram divididos em sete etapas descritas na Figura 2.

As dimensões e características dos materiais do ambiente foram definidas com base em trabalhos que avaliam a disponibilidade de luz natural no clima tropical (LARANJA, 2010; LIMA, 2015; MANHAS, 2016; CARVALHO, 2018; GUIDI *et al.*, 2018; DIAS *et al.*, 2018). O modelo adotado é um ambiente de 6,00 m x 6,00 m, com pé-direito de 3,00 m. A janela, em fita, com 1,00 m de pé-direito e 1,10 m de altura, conforme mostrado na Figura 3, sem obstruções externas. O vidro utilizado na janela é plano, comum, conforme Tregenza e Sharples (1993). As refletâncias das superfícies internas adotadas foram: 0,3 para o piso, 0,7 para as paredes internas e 0,8 para o teto.

Posteriormente foram escolhidos os índices de avaliação de desempenho da luz natural utilizados no estudo. A escolha se justifica nesta etapa metodológica tendo em vista que a determinação de alguns parâmetros de simulação, como malha de pontos e intervalo temporal, deve ser feita com base nos parâmetros requeridos para cada uma. Os índices escolhidos são apresentados no Quadro 2.

Em um estudo-piloto, com o mesmo ambiente e características dos materiais, foi verificado que a adoção do referencial de 300 lx para a ALNe seria facilmente atingido, fazendo com que os resultados do índice fossem pouco expressivos. Para minimizar tal efeito adotou-se o valor de 1000 lx, resultando em variações possíveis de serem analisadas estatisticamente. Os demais índices mantiveram seus valores referenciais.

As simulações ocorreram das 8h às 18h (hora legal), no meio do intervalo, todos os dias do ano. Foi utilizado o céu com distribuição dinâmica de luminâncias (CDDL) para a cidade de Maceió. O CDDL escolhe um dos tipos de céu CIE (COMMISSION..., 2002), de acordo com sua probabilidade, no dia e na hora calculados, usando os estudos de Cabús (2002) e de Manhas (2016). O modelo de céu utilizado utiliza a subdivisão de 145 e 5.221 partes CIE (COMMISSION..., 2002) conforme Cabús (2002).

Para todos os processamentos foi utilizado o mesmo modelo, variando apenas a malha de pontos, conforme o Quadro 3.

As malhas foram definidas variando-se a quantidade de pontos por eixo, de 2 a 15. O ponto de análise está posicionado no centro de cada setor, de forma a preencher todo o plano de trabalho. O conjunto de malhas escolhidas contempla as previstas pelas normas NBR 15215-4 (ANBT, 2005c) e a IES LM-83-12 (ILLUMINATING..., 2012) e acrescenta outras com mais e menos pontos. A utilização de malhas diferentes das previstas em norma e a verificação da sua relação com os índices estudados é o principal objetivo do trabalho.

As duas orientações do modelo – sul e leste – foram escolhidas tendo em vista a trajetória solar para a cidade de Maceió, AL, cidade utilizada para a

simulação. Para o modelo com janela voltada a sul o sol tende a iluminar diretamente uma porção menor do ambiente, mais próxima à janela, o que não acontece no modelo com janela orientada a leste, onde grande parte do ambiente, em metade do dia, recebe insolação.

A verificação da iluminância foi feita em um modelo computacional, utilizando o TropLux 7 (CABUS, 2005), software baseado nos métodos Monte Carlo, raio traçado e coeficientes de luz natural e largamente referenciado em trabalhos técnico-científicos (LARANJA, 2010; RAMOS; GHISI, 2010; BECKER *et al.*, 2011; ELETROBRAS-PROCEL, 2012; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; HAREDY, 2016; WENA; HIYAMA; KOGANEI, 2017).

Figura 2 - Fluxograma geral do método

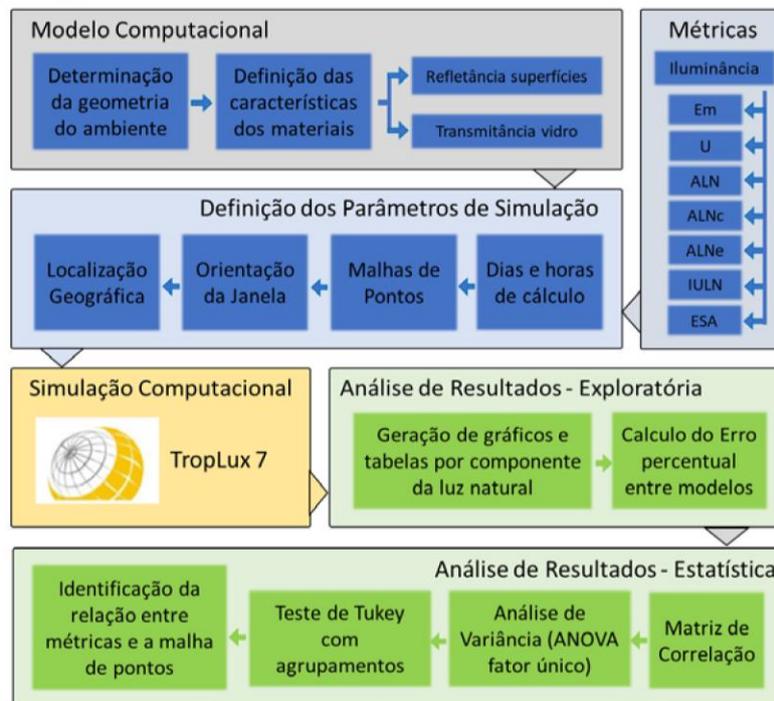
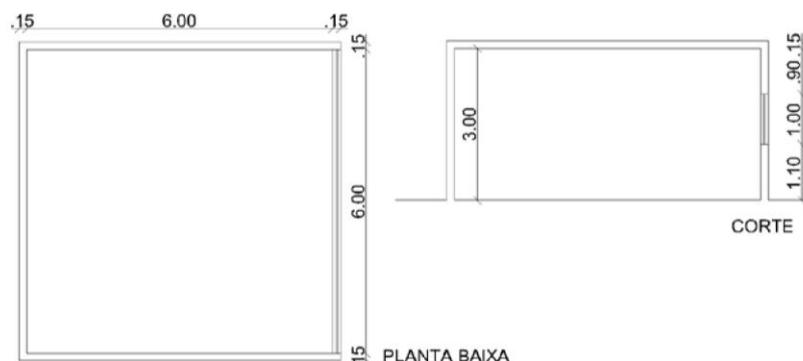


Figura 3 - Planta baixa e corte do ambiente utilizado nas simulações computacionais



Quadro 2 - Resumo dos índices avaliados no trabalho, sua origem e método de cálculo

Índice	Sigla	Referência	Forma de cálculo
Iluminância média	Em	(ANBT, 2005a, 2005b, 2005c)	Calculada a iluminância em cada ponto da malha, faz-se uma média de todos os valores no instante, obtendo-se a iluminância média (Em) no plano de trabalho. Para o estudo os dados foram agrupados de duas formas: média anual (Ema) para a parte exploratória e mensal para a estatística.
Uniformidade (da iluminância)	U	ABNT (2013b)	Razão entre a iluminância mínima e a iluminância média em todos os pontos de análise em um instante. Para o estudo os dados foram agrupados de duas formas: média anual (Uma) para a parte exploratória e mensal para a estatística.
Autonomia de luz natural	ALN	Reinhart e Walkenhorst (2001)	Percentual do conjunto de instantes (dias e horas) em que um valor de iluminância é atingido no ponto analisado.
Autonomia de luz natural contínua	ALNc	Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006)	Igual à ALN, entretanto o ponto recebe um crédito parcial caso não atinja o limite definido, diretamente proporcional à quão próximo ele chega do valor.
Autonomia de luz natural espacial	ALNe	IES (ILLUMINATING..., 2012)	Percentual da área do ambiente em que a ALN ultrapassa um valor de iluminância determinado. O normativo predefine um valor de 300 lx que pode ser alterado a depender do uso do ambiente.
Iluminância útil de luz natural	IULN	Nabil e Mardaljevic (2005)	Classificação da iluminância em quatro grupos. Cada grupo possui um limite inferior e superior de iluminância. O índice é o percentual do ano de ocorrências ao longo do em cada grupo.
Exposição solar anual	ESA	IES (ILLUMINATING..., 2012)	Percentual da área do ambiente em que que a componente de luz solar direta atinge ao menos 1.000 lx em mais de 250 horas por ano.

Quadro 3 - Disposição dos pontos analisados para cada modelo

nº	Malha	Pontos	Distância entre pontos (m)	Distância entre parede e ponto (m)	Atende a:	
					NBR 15215-4 (ANBT, 2005c)	IES LM-83-12 (ILLUMINATING..., 2012)
1	2 x 2	4	3,000	1,500	- ¹	- ¹
2	3 x 3	9	2,000	1,000	- ¹	- ¹
3	4 x 4	16	1,500	0,725	- ¹	- ¹
4	5 x 5	25	1,200	0,600	Sim	- ¹
5	6 x 6	36	1,000	0,500	Sim	- ¹
6	7 x 7	49	0,857	0,483	- ²	- ¹
7	8 x 8	64	0,750	0,375	- ²	- ¹
8	9 x 9	81	0,667	0,333	- ²	Sim
9	10 x 10	100	0,600	0,300	- ²	Sim
10	11 x 11	121	0,545	0,273	- ²	- ²
11	12 x 12	144	0,500	0,250	- ²	- ²
12	13 x 13	169	0,461	0,231	- ²	- ²
13	14 x 14	196	0,429	0,215	- ²	- ²
14	15 x 15	225	0,400	0,200	- ²	- ²

Nota: -¹ a dimensão da malha é menor que a prescrita pelo normativo; e -² a distância entre a o ponto e a parede é menor que o limite prescrito pelo normativo.

A análise dos resultados foi realizada em duas etapas: exploratória e estatística. Na primeira os resultados foram avaliados de forma descritiva, sendo calculada a diferença percentual (DP) entre o modelo analisado e o de malha imediatamente inferior. Os índices iluminância e uniformidade tiveram suas componentes estudadas separadamente, sendo elas: luz do sol (SD), luz do sol refletida (SR), luz difusa de céu (CD) e luz difusa de céu refletida (CR), conforme Cabús (2005).

A análise estatística foi separada em duas etapas. Na primeira todos os resultados foram avaliados por meio de uma matriz de correlação e significância. Na segunda etapa foram utilizadas as ferramentas da análise de variância (*One way ANOVA*), utilizada para a comparação de múltiplas médias (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). Para verificar as diferenças significantes entre as médias, como forma de determinar a partir de qual malha as médias dos índices são estatisticamente iguais, foi utilizado o teste de Tukey, que verifica quais as diferenças estatisticamente significantes entre as médias (CALLEGARI-JACQUES, 2003). O teste funciona como complementação da ANOVA, pois se nesta é verificado que as médias do conjunto são diferentes, o teste de Tukey indica quais são elas. Os cálculos foram feitos no software MINITAB versão 18.0¹.

Resultados e discussões

Inicialmente foram avaliados os resultados da iluminância média anual (Ema) por componente. Também foi calculada a diferença percentual (DP) entre o valor obtido e o anterior. Na Figura 4 é possível verificar, graficamente, os resultados das simulações separados por componente.

Observa-se que a parcela de luz refletida, seja do sol ou do céu, demonstra tendência semelhante nas duas orientações estudadas, tendo comportamento uniforme, ao passo que a malha de pontos aumenta. Em malhas de 3 pontos por eixo (distância entre pontos de 1,5 m) os resultados mostraram variação percentual menor que 5%.

As malhas com 8, 9 e 11 pontos por eixo apresentaram ligeira mudança na tendência observada. Nessas malhas, para as demais componentes, também será observado o mesmo efeito, conforme demonstrado nas próximas análises. Em vista das alterações indicadas, faz-se necessária a avaliação aprofundada desses resultados. A componente de luz refletida

apresentou variação significativa, ao passo que a quantidade de pontos na malha aumenta. Para a luz vinda do céu, de forma direta, malhas com mais de 4 pontos por eixo resultaram em diferenças percentuais menores que 5%.

As componentes de luz direta, seja do sol ou do céu, apresentaram comportamento distinto, mantendo grande variação percentual com o aumento da quantidade de pontos. Para a luz direta do céu a orientação da janela foi determinante na ausência de variação nos resultados, o que não foi perceptível nas análises anteriores. Na orientação sul observa-se a estabilização da variação a partir da malha com três pontos por eixo, enquanto na orientação leste esse desempenho acontece a partir de 12 pontos por eixo. Quando analisada a componente de luz difusa de céu, observa-se grande alteração com o aumento da malha de pontos. Não é possível obter uma constância na diferença percentual para os modelos analisados, indicando que essa componente deverá precisar de mais pontos por eixo para manter um comportamento estável.

A síntese dos resultados pode ser observada no gráfico da iluminância global, que é a somatória de todas as componentes. Nesse quadro percebe-se a tendência de manutenção da diferença percentual menor que 5% na malha com três pontos por eixo na orientação sul, e de seis pontos por eixo na orientação leste. Esse comportamento esconde o fato de que, analisadas separadamente, as componentes têm variações distintas e que para o cálculo da luz direta faz-se necessária a simulação de mais pontos por eixo a fim de se obterem resultados com grau de precisão aceitável.

A uniformidade média anual da iluminância também foi analisada em cada componente. Os resultados são apresentados na Figura 5. Observa-se que apenas a componente de luz do sol refletida apresenta diferença percentual maior que 5% em grande parte dos cenários estudados. Para a componente de céu, direta ou refletida, independentemente da orientação, os valores da diferença percentual são menores que 5% para malhas com mais de seis pontos por eixo.

Para o estudo da uniformidade da luz do sol, seja direta ou refletida, é preciso remeter-se diretamente ao comportamento da iluminância apresentado anteriormente. A luz solar direta apresenta grande variabilidade de Ema mesmo com o aumento da quantidade de pontos por eixo. Entretanto, não há variação da uniformidade na orientação sul, em todos os cenários estudados, o que reafirma a necessidade de uma malha mais refinada para a

¹O Minitab é um software utilizado para estudos estatísticos desenvolvido em 1972 e continuado pela Minitab INC State College, PA EUA.

determinação da iluminância quando da presença de insolação direta no espaço interno. Para orientação leste, observa-se estabilização da uniformidade, com seis pontos por eixo.

O comportamento distinto da uniformidade, nas duas orientações, justifica-se pelo fato de que na orientação sul a trajetória aparente do sol faz com que a região do plano de trabalho que recebe luz direta do sol esteja restrita a uma porção perto da janela, enquanto no ambiente com janela voltada a leste praticamente todo o plano de trabalho recebe luz solar direta, em algum instante do ano, na parte da manhã.

A avaliação da uniformidade média anual global (U_{ma}) permite observar que, para a orientação sul o ambiente tem variação percentual da uniformidade menor que 5%, a partir da malha com cinco pontos por eixo, o que só vai acontecer na orientação leste a partir de dez pontos por eixo.

Para o estudo da IULN e da ALN e suas derivadas não foram feitas distinções entre as componentes, tendo em vista que a aplicabilidade dos conceitos só existe na análise da iluminância global. Com relação à ESA, conceitualmente, apenas a iluminância solar direta é estudada. Os resultados são apresentados na Figura 6.

Os gráficos da ALN e da ALN_c apresentaram desvios muito pequenos em relação à média, e uma tendência rápida de estabilização dos seus valores. Essa tendência não é suficiente para afirmar que a quantidade de pontos no plano de trabalho não influencia o cálculo desses índices. A grande disponibilidade de luz natural encontrada na cidade utilizada nas simulações faz com que a quantidade de luz no ambiente seja suficiente para atingir o valor de referência na maioria dos instantes.

Figura 4 - Gráficos de iluminância média anual (Ema) - o eixo horizontal representa a quantidade de pontos por eixo, o eixo vertical esquerdo representa a grandeza das barras, e o eixo vertical direito a diferença percentual representada pelas linhas

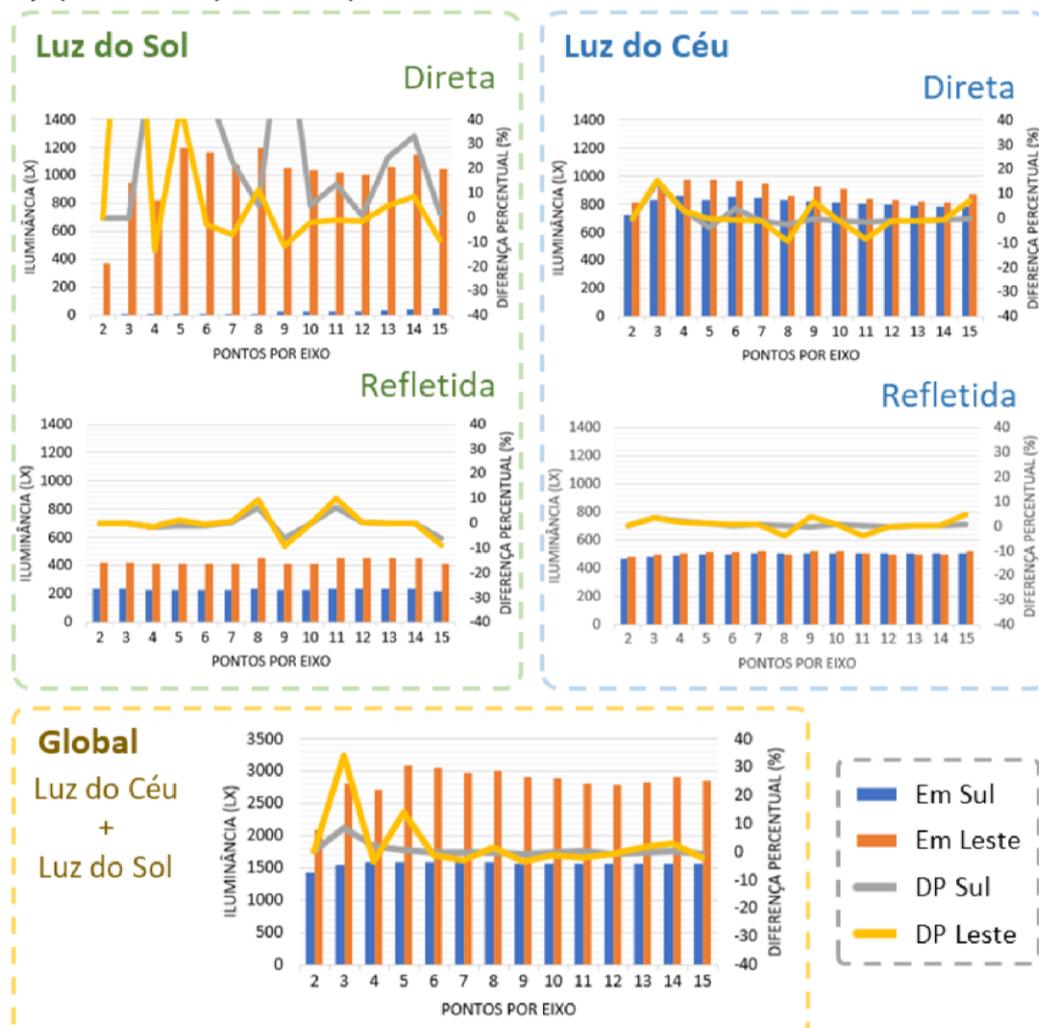


Figura 5 - Gráficos de uniformidade média anual (Uma) - o eixo horizontal representa a quantidade de pontos por eixo, o eixo vertical esquerdo representa a grandeza das barras, e o eixo vertical direito representa a diferença percentual representada pelas linhas

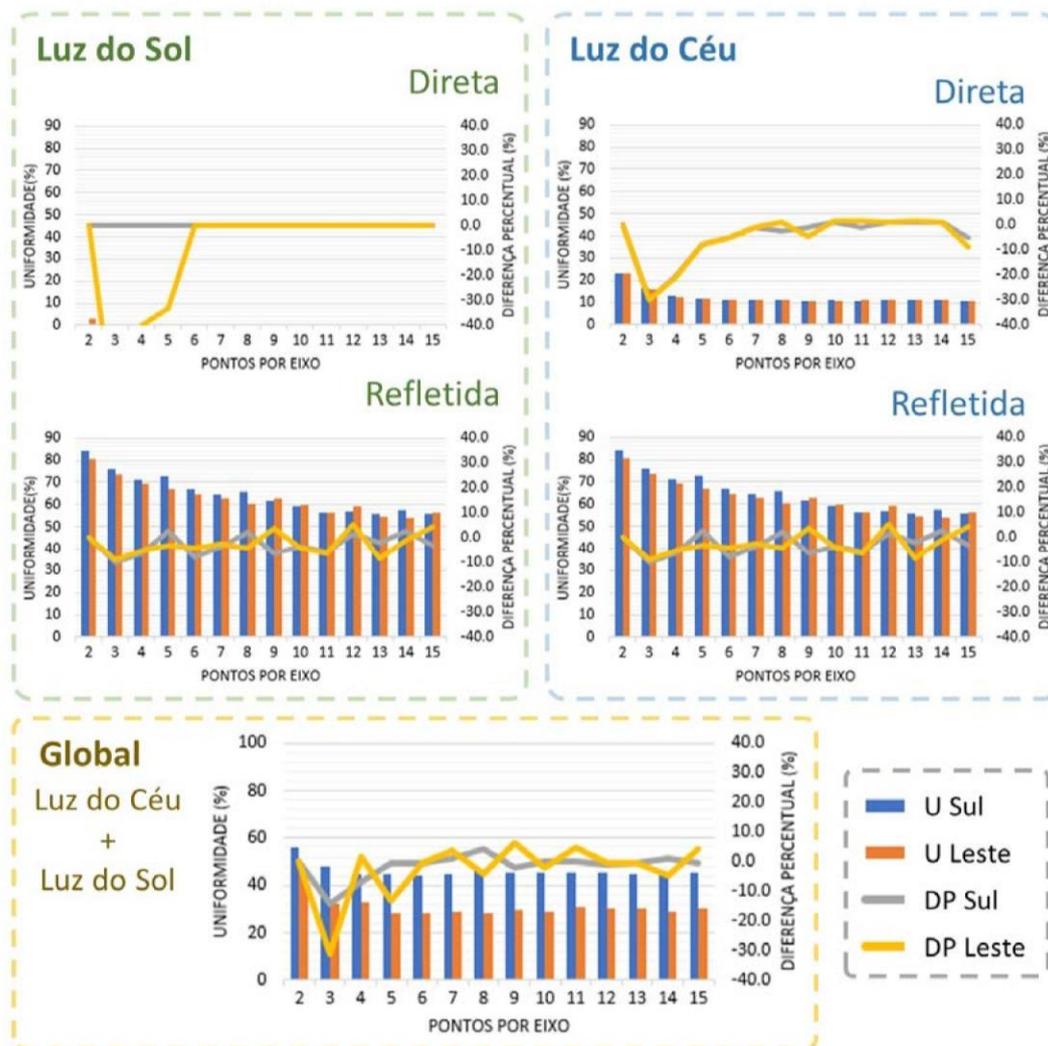
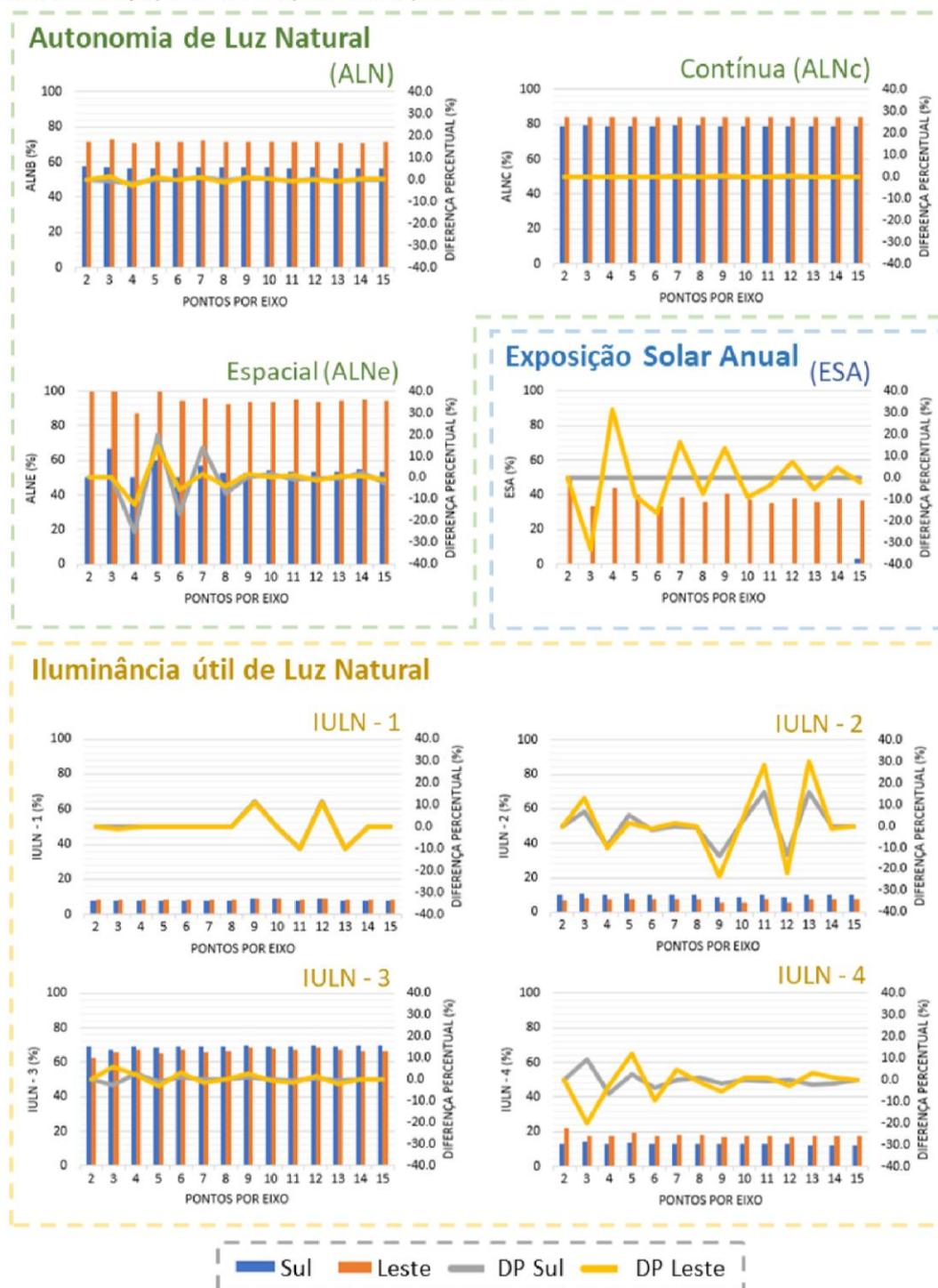


Figura 6 - Gráficos dos índices ALN, ALNc, ALNe, IULN e ESA - o eixo horizontal representa a quantidade de pontos por eixo, o vertical à esquerda representa a grandeza das barras, e o vertical à direita a diferença percentual representada pelas linhas



Quando a ALN_e é avaliada ao longo de todo o ano sua variação se apresenta mais evidente. Para as duas orientações, as malhas menores, com até sete pontos por eixo, mostraram diferença percentual expressiva, tendendo a apresentar pequena diferença, a partir de oito pontos por eixo para

ambas as orientações. Outro fator que apresentou grande variação foi a exposição anual solar. O gráfico mostra que apenas para os modelos com malhas maiores que 14 pontos por eixo os resultados tendem a ser constantes com a alteração da malha, ou são perceptíveis, como no caso da

orientação sul, admitindo uma diferença de 4%. Os gráficos de IULN apresentaram variação significativa da diferença percentual em malhas com mais pontos por eixo nas faixas 1, 2 e 4, e não foi possível observar a estabilização na variação dos resultados. Já na faixa 3, a de maior interesse para aproveitamento da luz natural, observa-se uma diferença percentual menor que 10% a partir de malhas com oito pontos por eixo.

Na análise inicial foi possível perceber que certos parâmetros são mais facilmente influenciados pela quantidade de pontos do que outros, mas que todos, em algum grau, sofrem influência dessa escolha. Aqueles calculados de forma anualizada, como a ESA, ou a ALNe, apresentam maior relação com o número de pontos de forma mais evidente que os demais. A análise se aprofunda quando verificado que a quantidade de pontos está diretamente relacionada à distância entre eles. Os cenários podem ser divididos pela orientação, outro fator importante na decisão.

Na orientação sul – em que a trajetória solar aparente com relação à janela faz com que a insolação direta seja menor, como pode ser observado nos valores de ESA – há tendência de que seis pontos por eixo, o que corresponde a uma distância entre pontos de 1,00 m, apresente desvios menores que 1% para Em e U. Para a ALN é preciso que haja mais de oito pontos por eixo, com distância entre pontos de no mínimo 0,75 m, para que a mesma diferença anterior seja obtida.

Na orientação leste, onde a trajetória solar faz com que haja maior entrada de luz solar direta, os resultados são diferentes, mas em todos é requerida uma quantidade de pontos por eixo menor para que a diferença percentual seja menor que 5%. Na iluminância média são necessários ao menos oito pontos por eixo, com uma distância entre pontos de no mínimo 0,75 m, para que a diferença se mantenha próxima aos 4%. Já na ALNe são precisos 11 pontos por eixo, o que equivale a pontos distantes 0,54 m entre si.

Importante notar que a quantidade de luz do sol que entra nos ambientes influencia diretamente os índices de desempenho da iluminação natural e, conseqüentemente, a escolha da malha de pontos adotada. O fato indica que há uma relação entre a área da janela e sua posição na escolha da malha de pontos de análise. Os parâmetros de ALNe e ESA apresentaram maior sensibilidade à variação, necessitando de malhas com distância entre pontos menores que 0,54 m, valor menor do que o prescrito pela IES LM-83-12 (ILLUMINATING..., 2012).

A fim de validar as inferências anteriores, os dados foram analisados utilizando ferramentas da estatística. Foi calculada a matriz de correlação,

tendo como parâmetro de comparação a quantidade de pontos por eixo (PPE) e a distância entre pontos (DEP). Um resumo é apresentado na Tabela 1. Para o cálculo, foram tomados como referência dois parâmetros do modelo, a PPE e a DEP. É importante notar que a DEP mostrou correlações mais fortes do que a PPE, principalmente em orientações com maior entrada de sol ao longo do ano, indicando-a como um parâmetro relevante na escolha da malha de análise.

Para a E_{ma} , as componentes de luz difusa de céu e luz do sol refletida foram as que não alcançaram valores de correlação com DEP ou PPE altos. Entretanto, as componentes de luz do sol e luz difusa de céu refletida apresentaram correlações expressivas. A luz advinda do sol de forma direta apresentou forte correlação com a malha e significância em ambas as orientações. Já a correlação entre a luz difusa de céu refletida e os índices analisados foi determinante apenas para a janela voltada a sul.

Observa-se ainda que os destaques apresentados na Tabela 1 estão concentrados nas componentes de E_{ma} e U_{ma} , que, quando analisadas globalmente, independentemente da orientação, apresentaram os maiores valores de correlação e os menores de significância.

Os valores pouco expressivos encontrados nos demais índices de avaliação do desempenho da luz natural indicam que o cálculo está diretamente relacionado à correta definição dos parâmetros na iluminância e na uniformidade. Apenas a IULN nas faixas 3 e 4 apresentaram, mesmo que pequena, alguma correlação, para a orientação leste, com maior entrada de luz solar. Esse resultado, associado à maior presença de correlações significativas, indica que a orientação com maior entrada de luz solar direta é aquela em que a região de influência dos pontos de análise deve ser definida de forma mais cuidadosa, o que implica maior precisão dos resultados. Para a orientação sul, em que a entrada de luz solar é menor, ainda assim faz-se necessário esse mesmo cuidado.

A não ocorrência de valores de ESA para a orientação sul em quase todos os modelos fez com que a correlação não se apresentasse significativa. Entretanto, na orientação leste, em que os valores de ESA variaram nos modelos, foi obtido um valor de correlação considerada significativa.

A matriz de correlação não consegue verificar as alterações dia a dia, já que trabalha apenas com o valor médio anual. Para tanto as análises de ANOVA foram realizadas utilizando dados mensais para a iluminância (E) e uniformidade (U). Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela 2.

Tabela 1 - Resumo da matriz de correlação entre a quantidade de pontos por eixo (PPE) e distância entre pontos (DEP) para os índices analisados nas duas orientações estudadas - as células destacadas em verde indicam as maiores correlações e as menores significâncias

	Orientação sul				Orientação leste			
	Correlação		Significância		Correlação		Significância	
	PPE	DEP	PPE	DEP	PPE	DEP	PPE	DEP
E _{ma} - CD	-0.26	-0.24	0.37	0.40	-0.55	0.14	0.04	0.63
E _{ma} - CR	0.79	-0.99	0.00	0.00	0.25	-0.53	0.41	0.05
E _{ma} - SD	0.98	-0.77	0.00	0.00	0.47	-0.80	0.09	0.00
E _{ma} - SR	0.25	-0.06	0.37	0.83	0.55	-0.44	0.04	0.11
E _{ma} - Global	0.35	-0.76	0.23	0.00	0.36	-0.72	0.25	0.00
U _{ma} - CD	-0.55	0.14	0.04	0.63	-0.63	0.94	0.02	0.00
U _{ma} - CR	0.24	-0.53	0.41	0.05	-0.87	0.91	0.00	0.00
U _{ma} - SD	0.47	-0.80	0.09	0.00	-0.45	0.84	0.11	0.00
U _{ma} - SR	0.55	-0.44	0.04	0.11	-0.93	0.96	0.00	0.00
U _{ma} - Global	0.33	-0.72	0.25	0.00	-0.49	0.83	0.08	0.00
ALN	-0.47	0.73	0.09	0.00	-0.10	0.32	0.74	0.26
ALN _c	-0.25	0.19	0.36	0.52	-0.17	0.24	0.24	0.41
ALN _e	-0.23	0.11	0.42	0.70	-0.31	0.45	0.29	0.11
IULN - 1	0.24	-0.30	0.41	0.30	0.24	-0.25	0.41	0.40
IULN - 2	-0.33	0.37	0.25	0.20	-0.33	0.31	0.25	0.29
IULN - 3	0.54	-0.56	0.05	0.04	0.43	-0.80	0.13	0.00
IULN - 4	-0.57	0.54	0.03	0.05	-0.55	0.78	0.04	0.00
ESA	0.45	-0.23	0.11	0.43	-0.42	0.61	0.13	0.02

Tabela 2 - Resumo dos resultados na ANOVA para iluminância (E) e uniformidade (U) - os resultados em destaque apontam a variável que não atende à hipótese testada; para a componente de luz do sol, por apresentar muitos valores zero, não foi possível o cálculo

Índice	Entre grupos							Dentro dos grupos			
	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	SQ	gl	MQ		
Sul	E	CD	222922	13	17148	0,2785	0,9939	1,7842	9E+06	154	61573
		CR	21794	13	1676,5	0,135	0,9999	1,7842	2E+06	154	12416
		SD	44578	13	3429,1	1,2781	0,2305	1,7788	450748	168	2683
		SR	1801,9	13	138,61	0,0222	1	1,7842	962463	154	6249,8
	U	CD	1905,5	13	146,57	38,771	7E-42	1,7842	582,19	154	3,7805
		CR	1614,8	13	124,22	130,13	6E-76	1,7842	147	154	0,9546
		SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		SR	11801	13	907,76	13,588	1E-19	1,7842	10288	154	66,807
Leste	E	CD	306478	13	23575	2,8272	0,0012	1,7842	1E+06	154	8338,6
		CR	22012	13	1693,2	0,6866	0,7743	1,7842	379792	154	2466,2
		SD	6E+06	13	476234	9,2746	6E-14	1,7842	8E+06	154	51348
		SR	522,14	13	40,165	0,0515	1	1,7842	120122	154	780,01
	U	CD	1816,5	13	139,73	5701,1	2E-199	1,7842	3,7744	154	0,0245
		CR	1528,8	13	117,6	257,85	2E-97	1,7842	70,236	154	0,4561
		SD	56,382	13	4,3371	6,7757	3E-10	1,7842	98,575	154	0,6401
		SR	8970,1	13	690,01	132,53	2E-76	1,7842	801,76	154	5,2062

Para as componentes em que o teste ANOVA indicou médias diferentes nos modelos foi realizado o teste de Tukey com agrupamentos, adotando uma confiança de 95%. Os resultados dos agrupamentos são apresentados na Tabela 3. O teste consegue definir a partir de que malha de pontos as médias podem ser consideradas iguais para a componente estudada.

Os resultados apresentados apontam definições importantes que ratificam as encontradas na análise exploratória inicial. Para a janela orientada a sul as alterações de iluminância não foram grandes o suficiente para que os resultados da análise estatística apontassem relação entre a iluminância e a malha de pontos. Entretanto, para a uniformidade,

é possível definir diferenças nos resultados a partir da variação da malha.

O agrupamento de Tukey indica que, para estabilizar a média da uniformidade na janela orientada a sul, são necessários quatro pontos por eixo (distância entre pontos de 1,50 m) na componente de luz difusa de céu (CD), e dez pontos por eixo (distância entre pontos de 0,60 m) nas componentes de luz difusa de céu refletida (CR) e luz do sol refletida (SR). Essas duas componentes apresentaram eventos que alteraram os valores na malha de 15 pontos por eixo, em que houve uma redução ou um pico repentino. Os eventos indicam a necessidade de avaliações com malhas de mais pontos. Para essa orientação, a componente refletida apresentou necessidade de mais pontos que a componente direta.

Para a janela orientada a leste, a quantidade de pontos por eixo para estabilizar a média da iluminância varia entre oito, para a componente de luz difusa de céu, e sete para a de luz do sol. As demais componentes estabilizaram suas médias já na menor malha. Para a uniformidade, os resultados

foram distintos em cada componente da luz, onde as malhas variam na quantidade de pontos por eixo de três (distância entre pontos de 2,00 m) na componente de luz do sol, passando por dez para as componentes de luz difusa de céu e refletida e indo até 13 na componente de luz do sol refletida (distância entre pontos de 0,46 m). Nas componentes de céu, aconteceram eventos de queda brusca nos valores para a malha de 15 pontos por eixo, o que reforça a necessidade de análises com malhas mais refinadas. A avaliação qualitativa da componente de luz do sol refletida mostrou grande variação e tendência de não estabilização da média, o que é ratificado pelos resultados da análise estatística.

A avaliação das duas formas de estudo, a exploratória e a estatística, permite concluir que as componentes apresentam comportamentos por vezes muito distintos entre si, entretanto é possível admitir alguns valores referenciais. Uma síntese dos resultados de iluminância e uniformidade é apresentada na Tabela 4 e, dos demais índices, na Tabela 5.

Tabela 3 - Resumo do teste de Tukey para iluminância (E) e uniformidade (U) apresentando os agrupamentos de cada componente - as barras mais grossas, destacadas entre as células, representam uma alteração no grupo entre elas; médias que não compartilham uma letra são consideradas significativamente diferentes

		Pontos por eixo															
		Índice	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Sul	U	CD	A	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	
		CR	A	B	B	C	C	CD	DE	DE	E	E	E	E	E	E	F
		SR	A	AB	BC	BC	BCD	BCDE	BCDE	CDE	DE	DE	DE	E	DE	E	E
Leste	E	CD	B	AB	A	A	A	A	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
		SD	C	AB	B	A	A	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
	U	CD	A	B	C	D	E	EF	HI	HI	GHI	IJ	GHI	FGH	EFG	J	J
		CR	A	C	B	D	D	D	E	E	GHI	EF	FG	EF	EFG	G	G
		SD	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
		SR	A	B	C	C	D	DE	DEF	DE	EFG	GH	FGH	H	H	H	H

Tabela 4 - Síntese dos resultados obtidos para iluminância (E) e uniformidade (U) apresentando o número de pontos por eixo (PPE) e distância entre pontos (DEP) para cada índice estudado

	Índice	Iluminância (E)					Uniformidade (U)				
		CD	CR	SD	SR	GL	CD	CR	SD	SR	GL
Sul	PPE	4	2	10 ⁽¹⁾	2	4	7	10	2	5 ⁽²⁾	5
	DEP (m)	1,50	3,00	0,60	3,00	1,50	0,86	0,60	3,00	1,20	1,20
Leste	PPE	4 ⁽³⁾	2	6 ⁽⁴⁾	2	4	6	6	6 ⁽⁵⁾	6 ⁽⁶⁾	4
	DEP (m)	1,50	3,00	1,00	3,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,50

Nota: Legenda:

- (1) Picos em 11, 13 e 14 PPE;
- (2) Médias não constantes de Tukey até 13 PPE;
- (3) Valores intermediários pelo teste de Tukey a partir de 8 PPE;
- (4) Valores intermediários pelo teste de Tukey a partir de 7 PPE;
- (5) Teste de Tukey não conclusivo; e
- (6) Muito variável pelo teste de Tukey, necessitando de mais avaliações.

Tabela 5 - Síntese dos resultados obtidos para iluminância e uniformidade apresentando o número de pontos por eixo (PPE) e distância entre pontos (DEP) para cada índice estudado

	Índice	ALN	ALNc	ALNe	IULN				ESA
					Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	
Sul	PPE	2	2	9	-(1)	6	2	5	-(1)
	DEP (m)	3,00	3,00	0,67	-	1,00	3,00	1,20	-
Leste	PPE	2	2	7	-(1)	5	4	7	11
	DEP (m)	3,00	3,00	0,86	-	1,20	1,50	0,86	0,55

Nota: (1) inconclusivo com as análises realizadas.

Observa-se grande variabilidade nos resultados, entretanto é possível admitir que para o cálculo da iluminância, uma malha de quatro pontos por eixo é suficiente para obter resultados aceitáveis com margem de tolerância de 5%. Já para atender aos critérios de uniformidade, é necessária uma malha com seis pontos por eixo. Importante observar que, mesmo com essas definições, a presença de variações, principalmente nas componentes refletida do céu e na luz do sol, faz com que a respectiva análise necessite de avaliação específica, a fim de validar os resultados obtidos.

Para os demais índices propostos, as malhas previstas pelas normas NBR 15215-4 (ANBT, 2005c) e para iluminância e uniformidade atendem bem à quantidade necessária de pontos. Apenas os índices de ALNe e ESA precisam ser avaliados com mais pontos, até 11 nesse último.

Conclusão

Os resultados apontam relações importantes entre os índices avaliados e a quantidade de pontos, ou a distância entre pontos, no plano de trabalho estudado. É possível afirmar que a distância entre pontos possui relação mais próxima aos índices de desempenho da luz natural que a quantidade de pontos na malha. Nesse sentido, a definição da quantidade de pontos em um plano de trabalho deverá considerar não apenas a quantidade, mas a distância entre eles. Ambientes com aberturas voltadas a orientações em que há entrada de luz solar direta em algum momento do dia apresentaram relação mais forte entre a malha de pontos e a variabilidade dos índices estudados. A pesquisa limitou-se a estudar a relação entre a malha e as métricas da luz natural, sem se aprofundar na forma de cálculo ou nos valores referenciais dos índices.

A avaliação separadamente dos índices que compõem a iluminância global aponta que há relações distintas entre eles e a malha de pontos. A luz vinda do sol, seja direta ou refletida, necessitou de mais pontos de análise para que os resultados se estabilizassem, ao contrário das componentes de

céu, principalmente a direta, onde malhas menores apresentaram valores constantes.

Para atingir valores estáveis de iluminância global foi necessária malha de no mínimo 3x3 pontos no modelo com abertura voltada a sul, e de no mínimo 6x6 pontos no com abertura voltada a leste. Já a uniformidade apresenta mesmo comportamento para no mínimo 5x5 pontos na orientação sul e no mínimo 10x10 pontos na orientação leste. Observa-se que orientações com maior entrada de luz solar direta necessitam de malhas com mais pontos de análise.

A avaliação dos demais índices apontou para o cálculo da ALN, ALNc, ALNe e IULN uma malha de no mínimo 6x6 pontos, com distância entre pontos de 1,00 m, e consegue obter resultados estatisticamente válidos, com pouca margem de diferença. A ALNe necessita de uma malha com mais pontos na orientação de maior entrada de luz solar direta. Importante notar que a ESA necessitou de uma malha de pontos com aproximadamente quatro vezes o necessário para os demais índices, com 11x11 pontos, ou distância entre pontos de 0,55 m, indicando que quando há entrada de luz do sol, ou se deseja analisar especificamente esse índice, os pontos deverão ter no máximo essa distância entre eles.

Diante do modelo e das situações estudadas é possível afirmar que a distância entre os pontos deverá ser de, no máximo, 0,54 m, e que, em situações nas quais se deseje estudar a componente solar direta utilize-se a metade desse valor. Análises utilizando outros valores referenciais de ALN podem melhorar a avaliação desse índice, já que para o valor adotado os resultados não foram significantes. O valor corrobora o que autores como Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) afirmam para a definição da ALN.

Observa-se que os índices de luz solar refletida, principalmente em orientações onde há maior entrada, precisam ser avaliados separadamente, pois sua variação nos modelos estudados foi expressiva. É possível, ainda, observar que se pode utilizar malhas diferentes para cada componente da luz natural, definindo malhas mais densas para a

componente direta e menos densas para a componente difusa, como já apontam outros estudos (BREMBILLA; MARDALJEVIC; ANSELMO, 2015).

Quando comparadas as malhas mínimas identificadas no estudo com aquelas definidas em norma, observa-se que a norma brasileira relativa à avaliação da iluminação natural em edificações NBR 15215-4 (ABNT, 2005c) precisa ser revista para as novas métricas desenvolvidas.

Para o modelo estudado, com abertura lateral e sem obstruções externas, a malha definida pela norma brasileira, de 5x5 pontos, é inferior àquela necessária à definição de todos os índices estudados, como apresentado nos resultados. A ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013b) traz uma formulação para iluminação artificial que se aproxima do prescrito pela IES LM-83-12 (IES, 2012), indicando a possibilidade de utilizar sua definição de malha de pontos para iluminação natural.

Os resultados apontam que a utilização de malhas diferentes no cálculo da iluminância, com mais pontos para a luz direta e menos para a luz difusa, pode ser estratégia importante na redução da demanda computacional, mantendo a precisão nos resultados.

Referências

- ALBUQUERQUE, M. S. C.; AMORIM, C. N. D. Iluminação Natural: indicações de profundidade-limite de ambientes para iluminação natural no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais – RTQ-R. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 37-57, abr./jun. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-2**: iluminação natural parte 2: procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-3**: iluminação natural parte 3: procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-4**: iluminação natural parte 4: verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações: método de medição. Rio de Janeiro, 2005c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO/CIE 8995-1**: iluminação de ambientes de trabalho: parte 1: interior. Rio de Janeiro, 2013b.
- ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS. **SN 418911**: éclairage intérieur par la lumière du jour. Zurich, 1989.
- BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, K. **Daylighting in Architecture**: a european reference book. Londres: James & James, 1993.
- BECKER, A. *et al.* Diagnostico Casa Hacienda Quilapilún: Asesoría en eficiencia energética y calidad ambiental. In: UNIVERSIDAD AUSTRAL DO CHILE (Org.). **Dossier Laboratorio de Estudios de Sustentabilidad, Instituto de Arquitectura y Urbanismo**. Valdivia: UAC, 2011.
- BREMBILLA, E.; MARDALJEVIC, J.; ANSELMO, F. The Effect of the Analysis Grid on Daylight Simulations With Climate-Based Daylight Modelling. In: INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, 28., Manchester, 2015. **Proceedings...** Manchester: CIE, 2015.
- CABÚS, R. C. **Tropical Daylighting**: predicting sky types and interior illuminance in North-East Brazil. Sheffield, 2002. 288 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) - University of Sheffield. Sheffield, 2002.
- CABÚS, R. C. TropLux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO, 4.; ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., Maceió, 2005. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2005.
- CALIFORNIA ENERGY COMISSION. **CEC 500-06-039**: daylight metrics. São Francisco, 2012.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística**: princípios e aplicações. Porto Alegre: Artamed, 2003.
- CARVALHO, M. L. S. **Eficiência da Luz Solar Refletida e Desempenho de Dispositivos de Sombreamento**: estudo para salas de aula na cidade de maceió. Maceió, 2018. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas do Espaço Habitado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

- CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. **Lighting Guide 10:** daylighting and Windows design. Londres: CIBSE, 1999.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **CIE DS 011.2/E:2002:** spatial distribution of daylight: CIE standard general sky. Viena, 2002.
- DIAS, A. R. D. *et al.* Influência de Métricas Dinâmicas na Avaliação do Aproveitamento da Luz Natural em Clima Tropical. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 29-47, jul./set. 2018.
- DOGAN, T; PARK, Y. A Critical Review of Daylighting Metrics for Residential Architecture and a New Metric for Cold and Temperate Climates. **Lighting Research & Technology**, Londres, p. 1-25, fev. 2018.
- ELETRÓBRAS-PROCEL. **Manual para Aplicação do RTQ-R**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2012.
- FERNANDEZ, P. M. E. **Iluminación Natural Diseñada a Través de la Arquitectura**. Sevilla, 2017. 634 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Curso de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2017.
- FONSECA, R. W, da; PEREIRA, F. O. R. Sequência Metodológica para a Estimativa da Iluminação Natural e Suas Implicações em Sistemas de Avaliação de Desempenho de Edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 55-68, jan./mar. 2017.
- FONTENELLE, M. R.; CLARO, A.; ARAÚJO, B. C. D. Influência de Elementos de Proteção Solar no Conforto Lumínico de Um Edifício Residencial Multifamiliar em Fortaleza - CE. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., Búzios, 2011. **Anais...** Rio de Janeiro: ANTAC, 2011.
- GUIDI, C. R. *et al.* Influência dos Parâmetros Urbanísticos e da Topografia na Admissão da Luz Natural em Edifícios Residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 49-66, jul./set. 2018.
- HAREDY, A. **Simulation of Photovoltaic Airflow Windows for Indoor Thermal and Visual Comfort and Electricity Generation**. Nottingham, 2016. 295 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Clima Urbano) - Departamento de Arquitetura e Clima Urbano, Universidade de Nottingham, Nottingham, 2016.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **LM-83-12:** IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). New York, 2012.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **The Lighting Handbook:** reference & applications. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2011.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **8995 CIE S 008/E:** lighting of indoor work places. Genebra, 2002.
- KLEINDIENST, S.; ANDERSEN, M. Comprehensive Annual Daylight Design through a Goal-Based Approach. **Building Research & Information**, v. 40, n. 2, p. 154-73, 2012
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL. 2014.
- LARANJA, A. C. **Parâmetros Urbanos e a Disponibilidade de Iluminação Natural no Ambiente Interno Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2010. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- LIMA, R. C. **Interferência do Entorno Construído na Disponibilidade de Luz Natural no Interior do Ambiente no Litoral Norte de Maceió - AL**. Maceió, 2015. 147 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas do Espaço Habitado, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2015.
- LITTLEFAIR, P. J.; AIZLEWOOD, M.; BIRTLES, A. B. The Performance of Innovative Daylighting Systems. **Renewable Energy**, Londres, v. 5, n. 2, p. 920-934, jan. 1994.
- MAIOLI, R. N.; ALVAREZ, C. E. de. Análise da Utilização de Prateleiras de Luz em Vitória-ES (Brasil). **Hábitat Sustentable**, Concepción, v. 3, n. 1, p. 37-46, jan. 2013.
- MANGKUTO, R. A.; ROHMAH, M.; ASRI, A. D. Design Optimization for Window Size, Orientation, and Wall Reflectance With Regard to Various Daylight Metrics and Lighting Energy Demand: a case study of buildings in the tropics. **Applied Energy**, Londres, v. 164, p. 211-219, fev. 2016.

MANHAS, M. P. G. Difusa ou Especular?

Estudando o desempenho da prateleira de luz segundo a refletância de sua superfície. Maceió, 2016. 212 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas do Espaço Habitado, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2016.

MARDALJEVIC, J. *et al.* Daylighting Metrics for Residential Buildings. In: SESSION OF THE CIE, 27., 2011, Sun City. **Proceedings...** Sun City: CIE, 2011.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.

Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 14. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful Daylight Illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. **Lighting Research & Technology**, Londres, v. 37, n. 1, p. 41-57, mar. 2005.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful Daylight Illuminances: a replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, Londres, v. 38, n. 7, p. 905-913, jul. 2006.

PEREIRA, D. C. L. **Iluminação Natural em Edifícios de Escritório:** metodologia para a avaliação do desempenho luminoso. São Paulo, 2017. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

PHILLIPS, D. **Natural Light in Architecture.** Burlington: Architectural Press as Elsevier, 2004.

RAKHA, T.; NASSAR, K. Genetic Algorithms for Ceiling Form Optimization in Response to Daylight Levels. **Renewable Energy**, Londres, v. 36, n. 9, p. 2348-2356, set. 2011.

RAMOS, G.; GHISI, E. Analysis of Daylight Calculated Using the EnergyPlus Programme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 1948-1958, 2010.

REINHART, C.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. **Leukos**, Ottawa, v. 3, n. 1, p. 7-31, jul. 2006.

REINHART, C.; WALKENHORST, O. Validation of Dynamic RADIANCE-Based Daylight Simulations for a Test Office With external BLINDS. **Energy and Buildings**, Freiburg, v. 33, n. 1, p. 683-697, jan. 2001.

SLATER, A. I; BOYCE, P. R. Illuminance Uniformity on Desks: Where is the limit? **Lighting Research & Technology**, Londres, v. 4, n. 22, p. 165-174, 1990.

TREGENZA, P.; SHARPLES, S. **Daylight Algorithms.** Sheffield: Universidade de Sheffield, 1993.

WENA, L.; HIYAMA, K.; KOGANEI, M. A Method for Creating Maps of Recommended Window-to-Wall Ratios to Assign Appropriate Default Values in Design Performance Modeling: a case study of a typical office building in Japan. **Energy & Buildings**, v. 145, p. 304-317, 2017.

Pedro Vitor Sousa Ribeiro

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal de Alagoas | Campus A. C. Simões, Tabuleiro do Martins | Maceió - AL - Brasil | CEP 57072-970 | Tel.: (82) 3214-1314 | E-mail: pedrovrsouza@gmail.com

Ricardo Carvalho Cabús

Centro de Tecnologia | Universidade Federal de Alagoas | E-mail: r.cabus@ctec.ufal.br

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

APÊNDICE 3 - Artigo 3 publicado nos anais do ENTAC 2020



Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais

Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

RELAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO DAS MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA LUZ NATURAL E A SETORIZAÇÃO DA MALHA DE PONTOS DE SIMULAÇÃO¹

RIBEIRO, Pedro Vitor Sousa (1); CABÚS, Ricardo Carvalho (2)

(1) Universidade Federal de Alagoas, pedrovsribeiro@gmail.com

(2) Universidade Federal de Alagoas, r.cabus@ctec.ufal.br

RESUMO

O estudo do comportamento da iluminação natural no ambiente construído pode ser feito utilizando as métricas de desempenho da luz natural. Seu cálculo pressupõe a definição de parâmetros, como a malha de sensores no plano de trabalho, que é uniformemente distribuída no plano. Este artigo tem objetivo de identificar a relação entre a malha de pontos de cálculo da iluminação natural e as métricas de desempenho. As métricas estudadas foram: Iluminância média (E_m); Uniformidade (U); Autonomia da Luz Natural (ALN) e espacial (ALNe); Iluminância Útil de Luz Natural (IULN); e Exposição Solar Anual (ESA). Utilizando um ambiente com abertura lateral em fita, sem obstrução externa, o plano de trabalho foi dividido em nove setores de mesma área, em que foi variada a malha de 1x1 a 6x6 no setor. A simulação computacional foi realizada pelo TropLux 8, seguidas das análises exploratória e estatística. Observou-se que setores mais próximos a abertura necessitam de malhas com maior densidade de pontos para que as componentes da luz natural mantivessem valores estáveis. O estudo aponta que o processamento das malhas para as componentes da luz natural direta e refletida pode ser realizado em separado, com densidades diferentes de pontos por setor.

Palavras-chave: Iluminação natural. Malha de pontos. Índices de desempenho da luz natural.

ABSTRACT

The study of the daylighting behaviour in the built environment can be done using tools such as daylight performance metrics. Its calculation presupposes the definition of parameters, such as the sensors grid in the working plane, which is evenly distributed in the plane. This article aims to identify the relationship between the grid of points of natural lighting calculation and performance metrics. The metrics studied were: Average Illuminance (E_m); Uniformity (U); Daylight Autonomy (DA) and Spatial Daylight Autonomy (sDA); Useful Daylight Illumination (UDI); and Annual Solar Exposure (ASE). Using an environment with lateral opening, without external obstruction, the work plan was divided into nine sectors of the same area, in which the mesh was varied from 1x1 to 6x6 in the sector. The computational simulation was performed by TropLux, followed by exploratory and statistical analysis. It was observed that sectors closer to the opening need meshes with higher point density so that the components of natural light maintain stable values. The study points out that the mesh processing for the components of

¹ RIBEIRO, Pedro Vitor Sousa; CABÚS, Ricardo Carvalho. Relação entre o comportamento das métricas de avaliação do desempenho da luz natural e a setorização da malha de pontos de simulação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

direct and reflected natural light can be performed separately, with different densities of points per sector.

Keywords: *Daylighting. Grid of points. Daylight metrics.*

1 INTRODUÇÃO

O uso da luz natural no ambiente construído é uma importante estratégia para o desenvolvimento das edificações e os avanços tecnológicos permitem a melhoria na sua captação, seja por aberturas laterais ou zenitais (BAKER; STEEMERS, 2002). A definição de padrões de referência para a quantidade de luz natural dentro do ambiente construído sempre foi um desafio para aqueles que estudam a relação entre percepção e estímulos, como aponta Hopkinson (1963). Segundo Moon (1936) a quantidade de luz no ambiente não pode ser baseada exclusivamente em aspectos físicos, mas também no usuário do espaço, a tarefa que realiza, sua posição no ambiente, a posição do plano de trabalho, e outros fatores fisiológicos e psicológicos que a define.

As tentativas para criação de ferramentas que permitam avaliar de forma abrangente o desempenho luminoso das edificações têm se sucedido ao longo das últimas décadas e vêm se tornando cada vez mais sofisticadas. O desenvolvimento das métricas de avaliação do desempenho da luz natural foi um passo importante no estudo do ambiente construído. Seu cálculo implica na definição de alguns parâmetros, como a quantidade de pontos de medição, tipo de céu e horário.

A malha de pontos é um fator importante no cálculo das métricas e os normativos geralmente a definem baseando-se nas dimensões do ambiente. A norma brasileira para iluminação natural (ABNT, 2005) prevê o cálculo da malha utilizando uma formulação que leva em conta as dimensões do ambiente e a posição do plano de trabalho. Outras normas utilizam a mesma formulação, como no caso da norma mexicana NOM-025-STPS-2008 (DGN, 2008), mas preveem uma maior densidade de pontos. A LM 83-12 (IES, 2012) descreve de forma objetiva os requisitos de horas e dias do ano para as métricas Exposição Solar anual (ESA) e a Autonomia de Luz Natural espacial (ALNe), apresentando uma formulação para o cálculo da malha, entretanto para outras métricas, como a Iluminância Útil de Luz Natural (IULN) não se encontram requisitos de quantidade de pontos. (NABIL E MARDALJEVIC, 2006).

Até então os pontos de cálculo são dispostos sempre em uma malha e distribuídos de forma uniforme pelo ambiente. Estudo recente (BREMBILLA; MARDALJEVIC; ANSELMO, 2015) aponta que outros tipos de distribuição podem promover maior precisão nos resultados e menor tempo de processamento. Os autores apontam ainda que a escolha de malhas com mais de um metro de distância entre os pontos podem trazer prejuízos para a precisão das métricas, e que os pontos mais próximos aos limites do plano de trabalhos são os mais sensíveis a tais alterações.

Diante dos poucos estudos sobre a possibilidade de distribuição dos pontos de forma não uniforme pelo plano de trabalho, e tendo como base estudos anteriores que apontam a eficácia de tal método, o artigo tem objetivo de estudar a influência da quantidade de pontos de simulação nas métricas de avaliação do desempenho da luz natural. O artigo apresenta resultados parciais da tese de doutorado do autor (1).

2 METODOLOGIA

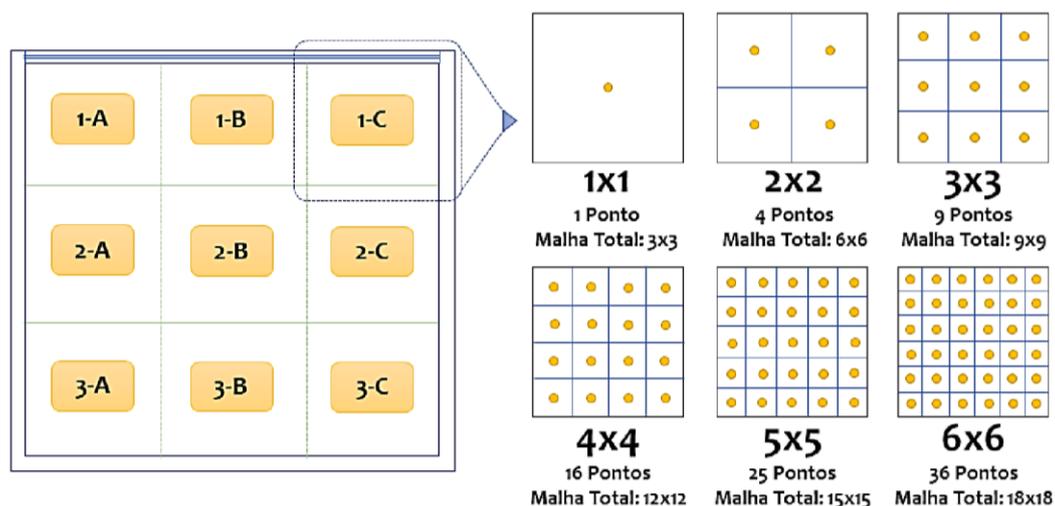
A definição do modelo teve como base trabalhos que avaliam a disponibilidade de luz natural no clima tropical (GUIDI et al., 2018; CARVALHO, 2018; DIAS et al., 2018). As dimensões adotadas foram de 6,00m x 6,00m, com pé direito de 3,00m. A janela é

lateral, em fita, com 1,00m de altura e 1,10m peitoril, sem obstruções externas. As refletâncias do piso, paredes e teto foram de 0,3; 0,7 e 0,8 respectivamente.

Para a definição dos parâmetros de processamento foi necessário definir as métricas de avaliação do desempenho luminoso utilizadas na análise dos resultados, são elas: Iluminância Média (Em) (ANBT, 2005, 2013a), Uniformidade (U) (ABNT, 2013b), Autonomia de Luz Natural espacial (ALNe) (IES, 2012), Iluminância Útil de Luz Natural (IULN) (Nabil e Mardaljevic, 2005) e a Exposição Solar Anual (ESA) (IES, 2012). A escolha das métricas baseia-se em trabalho anterior dos autores (RIBEIRO; CABUS, 2019), onde foi estudada a variação na quantidade de pontos, como sendo aquelas mais influenciadas pela variação da malha.

As simulações ocorreram das 8h às 18h, em hora legal, no meio do intervalo horário, todos os dias do ano, totalizando 3.650 horas, como previsto pela IES LM-83 (IES, 2012). Foi utilizado o Céu com Distribuição Dinâmica de Luminâncias (CDDL) para a cidade de Maceió. O CDDL escolhe um dos tipos de céu CIE (2002), de acordo com sua probabilidade, no dia e na hora calculados, usando os estudos de Cabús (2002) e de Manhas (2016). Para a definição dos pontos de processamento o plano de trabalho foi dividido em nove setores de igual área, conforme apresentado na Figura 1, dentro dos quais foi variada a quantidade de pontos de análise. A malha dentro dos setores variou de 1x1 a 6x6 pontos, que corresponde a uma variação em todo o plano de trabalho de 3x3 a 18x18 pontos.

Figura 1 – Disposição dos setores em planta e malha por setor para o modelo utilizado nas simulações.



O processamento foi feito em duas orientações de janela, sul e leste, tendo em vista a trajetória solar aparente para a cidade de Maceió-AL, utilizada para a simulação. Para a simulação computacional foi utilizado o software TropLux 8.

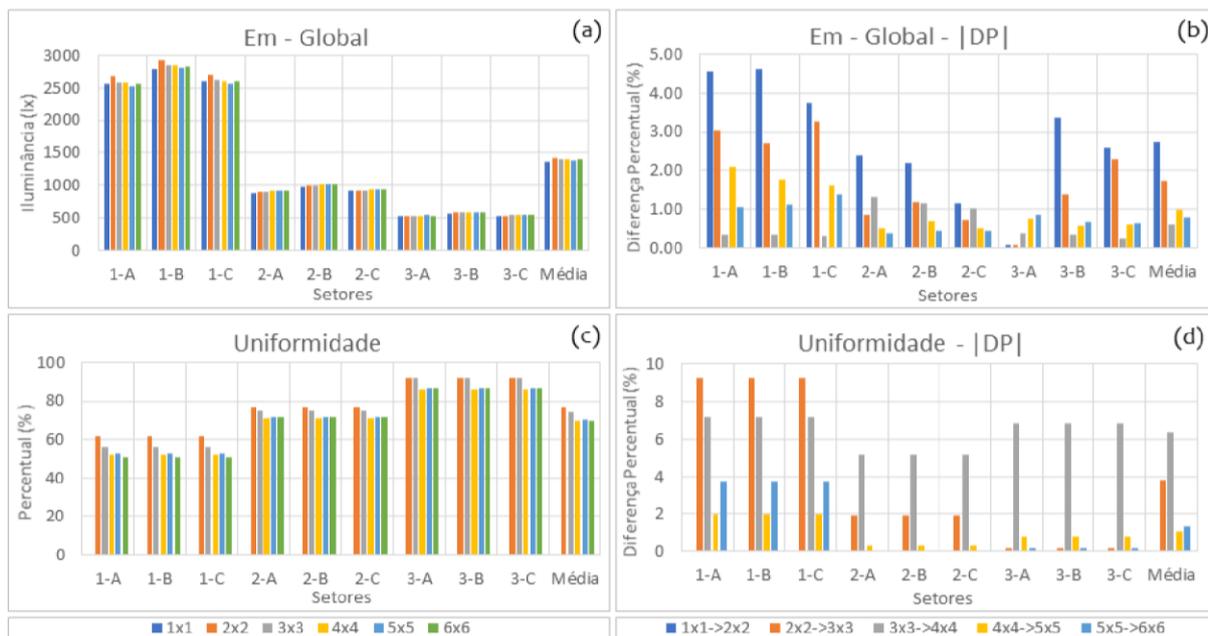
A análise dos resultados foi realizada em duas etapas: exploratória e estatística. Na primeira os resultados foram avaliados de forma descritiva, sendo calculada a diferença percentual (DP) entre a média do modelo analisado e do de malha imediatamente inferior. Para a análise estatística foi avaliada apenas a iluminância, e suas componentes estudadas separadamente, sendo elas: sol direto (SD), sol refletido (SR), céu direto (CD) e céu refletido (CR), conforme Cabús (2005). Inicialmente foi adotada a análise de variância (One way ANOVA), utilizada para a comparação de múltiplas médias (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). Para verificar as diferenças significantes entre as médias, como forma de determinar a partir de qual

malha as médias dos índices são estatisticamente iguais, foi utilizado o teste de Tukey, que verifica quais as diferenças estatisticamente significantes entre as médias (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Os cálculos foram feitos no software MINITAB® versão 19.01. Para o cálculo da ANOVA e do teste de Tukey a planilha de dados utilizada compreendeu os resultados obtidos dia a dia, hora a hora, para cada uma das componentes da luz natural.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados será dividida em duas etapas: exploratória e estatística. Tendo em vista o grande volume de resultados nessa primeira serão apresentados os dados da janela orientada a sul. A diferença entre os resultados para as duas orientações é que aqueles observados nos setores mais próximos à janela no modelo orientado a sul avançam para setores mais distantes da janela no modelo com janela orientada a leste. Os resultados da iluminância média global e da uniformidade, bem como a diferença percentual entre os modelos são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Resultados de Iluminância Global e Uniformidade por setor, e a DP entre os valores para a janela orientada a sul.



A uniformidade para a malha de 1x1 não apresenta valores no gráfico já que há apenas um ponto no plano de trabalho. Observa-se que nos setores próximos à janela o comportamento muda ao passo que a quantidade de pontos aumenta, o que acontece de forma menos evidente nos setores mais distantes. Para a janela orientada a leste o comportamento avança para a linha 2, tendo em vista a maior penetração da luz natural. O comportamento da uniformidade já apresenta mudança em todos os setores quando da alteração na malha de pontos, entretanto aqueles próximos à janela possuem DP maior que os demais.

Essa maior sensibilidade à mudança na quantidade de pontos dentro dos setores mais próximos à janela pode ser observada também em todas as componentes da luz natural. Importante ressaltar que em todas elas há variação do valor médio do setor com a alteração da malha. A componente de sol direto apresentou comportamento distinto das demais, pois apenas os setores da linha 1, para a

orientação sul, e das linhas 1 e 2 para a leste, apresentaram incidência solar direta, significando que aqueles setores mais distantes da janela, para tal componente, não foi relevante a alteração de malha, já que não há incidência solar. As métricas de avaliação do desempenho da luz natural apresentam comportamento semelhante ao observado para a iluminância e suas componentes, entretanto em duas foi possível identificar algumas particularidades, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Resultados das métricas ALN, ALNe, IULN e ESA por setor, e a DP entre os valores para a janela orientada a sul.

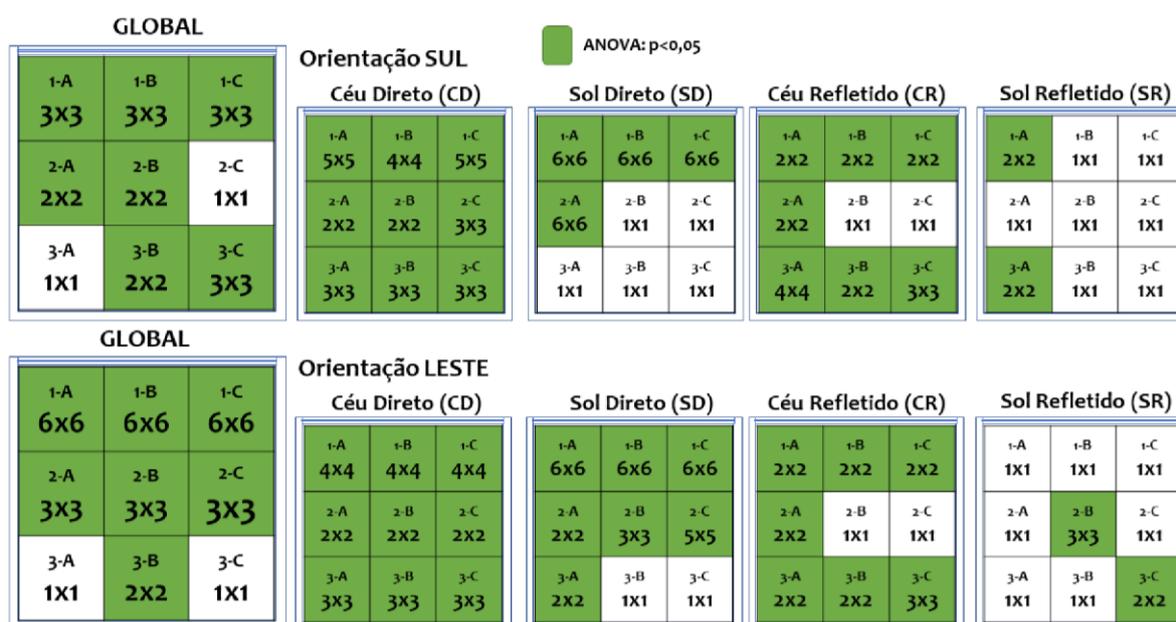


Os gráficos de DP que não apresentam valores são aqueles onde a variação de malha não alterou o valor da métrica, fazendo com que a DP fosse zero. Os comportamentos da ALN e da IULN são possuem pouca variação frente aumento na quantidade de pontos, apenas para os setores próximos à janela que se observa alguma mudança, mas sempre com DP inferior a 5%. O comportamento da ALNe nos setores próximos à janela, da linha 1, onde há maior incidência solar, é o mesmo independente da quantidade de pontos por setor, já nas regiões mais distantes o comportamento é diferente. Na linha de setores 2 observa-se a variação da ALNe ao passo que a quantidade de pontos no setor aumenta, entretanto, as diferenças percentuais ainda são altas. Já nos setores da linha 3, mais distantes da abertura, não é observada ALNe, em vista da pouca quantidade de luz natural disponível nessa região. Para a ESA acontece algo diferente das demais métricas, apenas para malhas acima de 4x4 pontos por setor é que são computados valores, e apenas nos

setores próximos à janela. Os resultados até então apresentados apontam para o fato de que os comportamentos em cada setor diferem entre si, e que a distância à abertura é um importante fator definidor de tal comportamento.

Para a análise estatística serão apresentados os resultados para as duas orientações estudadas. Para o teste de ANOVA, cujos resultados são apresentados de forma esquemática na Figura 4, os setores marcados em verde são aqueles que possuem médias estatisticamente diferentes com a variação da malha. Para a janela orientada a sul, em apenas dois setores, 2-C e 3-A as médias são estatisticamente iguais, entretanto para os demais há diferença entre as médias para o conjunto analisado. Apenas a componente de céu direto, como já observado na análise exploratória, obteve em todos os setores médias diferentes com a variação na densidade de pontos por setor. Os setores mais próximos à janela obtiveram médias estatisticamente distintas, o que reforça as conclusões da análise exploratória. Para as componentes de luz refletida tanto setores mais próximos da janela, como aqueles mais ao fundo, obtiveram valores que indicam médias estatisticamente diferentes. O comportamento é semelhante ao da outra orientação estudada, mas vale notar que a componente de sol direto obteve resultados diferentes. Para o modelo nessa orientação, a penetração de luz solar nas áreas mais distantes da janela é maior, o que foi verificado também na análise exploratória anterior, fazendo com que na ANOVA fosse observado que além dos setores mais próximos da janela (1-A, 1-B e 1-C), aqueles na linha central (2-A, 2-B e 2-C) também obtiveram médias estatisticamente diferentes.

Figura 4 – Resultado do teste de ANOVA e Tukey para a iluminância e suas componentes. A cor verde indica que o setor apresenta diferença significativa entre médias, com a malha de pontos em que, a partir dela, os resultados são estatisticamente iguais.



Os resultados do agrupamento de Tukey também são apresentados na Figura 4. Ao verificar os resultados obtidos para a componente direta observa-se que os setores 1-A, 1-B e 1-C obtiveram estabilidade nas médias somente a partir da malha de 6x6 no setor, esse mesmo resultado pode ser verificado na componente de sol direto. Tal comportamento reafirma aquele observado na análise exploratória. As

componentes refletidas, seja de céu ou de sol, apresentaram pouca variação de média, comportamento que se reflete em médias estáveis já nas malhas de 4x4 para o céu e 2x2 para o sol.

Nos resultados obtidos no teste de Tukey para a janela orientada a leste nota-se que para iluminância global os pontos mais próximos à janela só vão obter médias estáveis a partir da malha de 6x6 pontos por setor, enquanto aqueles mais distantes da janela a malha de 3x3 pontos já obtém resultados estatisticamente semelhantes entre si. A quantidade de pontos necessários para a estabilização dos resultados tende a diminuir com o aumento da distância à abertura, o que evidencia uma relação entre os dois parâmetros.

Nos casos em que o teste de Tukey aponta como média estável a malha de 6x6 pontos dentro do setor vale destacar que, para as situações estudadas, esta não necessariamente é a ideal. A ocorrência de outliers nas séries de médias pode fazer com que, em alguns casos, o teste de Tukey aponte malhas com mais pontos como ideal. Para a verificação de tal comportamento seria necessário realizar processamentos com mais pontos.

4 CONCLUSÕES

Foi possível verificar que quando analisado setor a setor os resultados e os comportamentos de cada um são diferentes quanto à iluminância e suas métricas. Setores mais distantes da janela tendem a ter comportamento mais estável frente à variação na densidade de pontos, enquanto naqueles mais próximos à janela, que possuem conseqüente maior visão de céu, a grande variação na iluminância implica em malhas mais refinadas. A generalização do comportamento nos setores próximos à janela visa indicar um comportamento que atende às métricas estudadas, já que para a ALNe a quantidade de pontos nos setores próximos à janela não influenciou no resultado desta métrica.

Importante destacar que o comportamento das componentes direta e refletida é distinto, e se relacionam com questões diferentes do espaço. Enquanto a componente direta está relacionada com a visão de céu e a possibilidade de insolação, a componente refletida relaciona-se diretamente com a distância à abertura. Observa-se que os índices de luz solar refletida, principalmente em orientações onde há maior entrada de luz natural, precisam ser avaliados separadamente, pois sua variação nos modelos estudados foi expressiva. É possível, ainda, observar que se pode utilizar malhas de diferentes densidades por setor para cada componente da luz natural, definindo malhas mais densas para a componente direta e menos densas para a componente difusa. Os resultados apontam ainda que a utilização de malhas diferentes no cálculo da iluminância, com mais pontos para a luz direta e menos para a luz difusa, pode ser estratégia importante na redução da demanda computacional, mantendo a precisão nos resultados.

O artigo não se propõe a definir a densidade de pontos por setorização, mas aponta que tal metodologia de definição dos pontos de processamento pode implicar na melhor quantificação das métricas de avaliação do desempenho da luz natural.

AGRADECIMENTOS

À Capes pela bolsa de pesquisa e ao Grupo de Pesquisa em Iluminação (GRILU) da Universidade Federal de Alagoas

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15215-4: **Iluminação Natural** Parte 4 – verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – método de medição. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. ISO/CIE 8995-1: **Iluminação de Ambientes de Trabalho – Parte 1 - Interior**. Rio de Janeiro, 2013a.
- _____. NBR 15575-1: **Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 1 – Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2013b.
- BAKER, N.; STEEMERS, K. **Daylight Design of Buildings**. 1. ed. Londres: James, v. 1, 2002.
- BREMBILLA, E.; MARDALJEVIC, J.; ANSELMO, F. The effect of the analysis grid on daylight simulations with climate-based daylight modelling. In: The 28th session of the International Commission on Illumination: CIE 2015, 28., Manchester, 2015. **Anais[...]** Manchester: CIE, 2015, p. 125 - 135.
- CABÚS, R. C. **Tropical Daylighting: predicting sky types and interior illuminance in North-east Brazil**. 2002. 288p. Tese (Doutorado em Arquitetura) - University of Sheffield. Sheffield, England, 2002
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2003. 255p
- CARVALHO, M. L. S. **Eficiência da luz solar refletida e desempenho de dispositivos de sombreamento: estudo para salas de aula na cidade de Maceió**. 2018. 196 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.
- CIE - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. (2002) **Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky**. Viena: CIE. (CIE DS 011.2/E:2002).
- DGN - DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS. **NOM-025-STPS-2008: Condiciones de Iluminacion en los centros de trabajo**. 1 ed. Mexico: DGN, 2008
- DIAS, A. R. D. *et al.* Influência de métricas dinâmicas na avaliação do aproveitamento da luz natural em clima tropical. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p.29-47, set. 2018.
- GUIDI, C. R. *et al.* Influência dos parâmetros urbanísticos e da topografia na admissão da luz natural em edifícios residenciais. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 49-66, jul./set. 2018.
- HOPKINSON, R. G. **Architectural Physics: Lighting**. Londres: Her Majesty's Stationery Office, 1963. 372 p.
- IES – ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **The Lighting Handbook: Reference & Applications**. New York: Illuminating Engineering Society of North America. 9 ed. 2000.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 14. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 490 p.
- MOON, P. **The Scientific Basis of Illuminating Engineering**. Londres: McGraw-Hill, 1936. 620 p.
- NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful Daylight Illuminances: a replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, Londres, v. 38, n. 7, p. 905-913, jul. 2005
- RIBEIRO, P. V. S.; CABÚS, R. C. Análise da influência da malha de pontos em índices de avaliação de desempenho da luz natural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 317-333, out./dez. 2019.

APÊNDICE 4 - Dados Numéricos: Fases 1 e 2 - Síntese dos resultados

Tabela 15 - Síntese dos resultados obtidos para iluminância e uniformidade apresentando a malha e sua área relativa para cada índice estudado.

	Índice	Iluminância (E)					Uniformidade (U)				
		GL	CD	CR	SD	SR	GL	CD	CR	SD	SR
Sul	Malha	4x4	4x4	2x2	10x10 ⁽¹⁾	2x2	5x5	7x7	10x10	2x2	5x5 ⁽²⁾
	Área	1,44	1,44	4,00	0,30	4,00	1,00	0,56	0,30	7,00	1,00
Leste	Malha	4x4	4x4 ⁽³⁾	2x2	6x6 ⁽⁴⁾	2x2	4x4	6x6	6x6	6x6 ⁽⁵⁾	6x6 ⁽⁶⁾
	Área	1,44	1,44	4,00	0,75	4,00	1,44	0,75	0,75	0,75	0,75

(1) Picos em 11, 13 e 14 PPE; (2) Médias não constantes de Tukey até 13 PPE; (3) Valores intermediários pelo teste de Tukey a partir de 8 PPE ; (4) Valores intermediários pelo teste de Tukey a partir de 7 PPE; (5) Teste de Tukey não conclusivo; (6) Muito variável pelo teste de Tukey, necessitando de mais avaliações

Tabela 16 - Síntese dos resultados obtidos para iluminância e uniformidade apresentando o número de pontos por eixo (PPE) e a área relativa para cada índice estudado

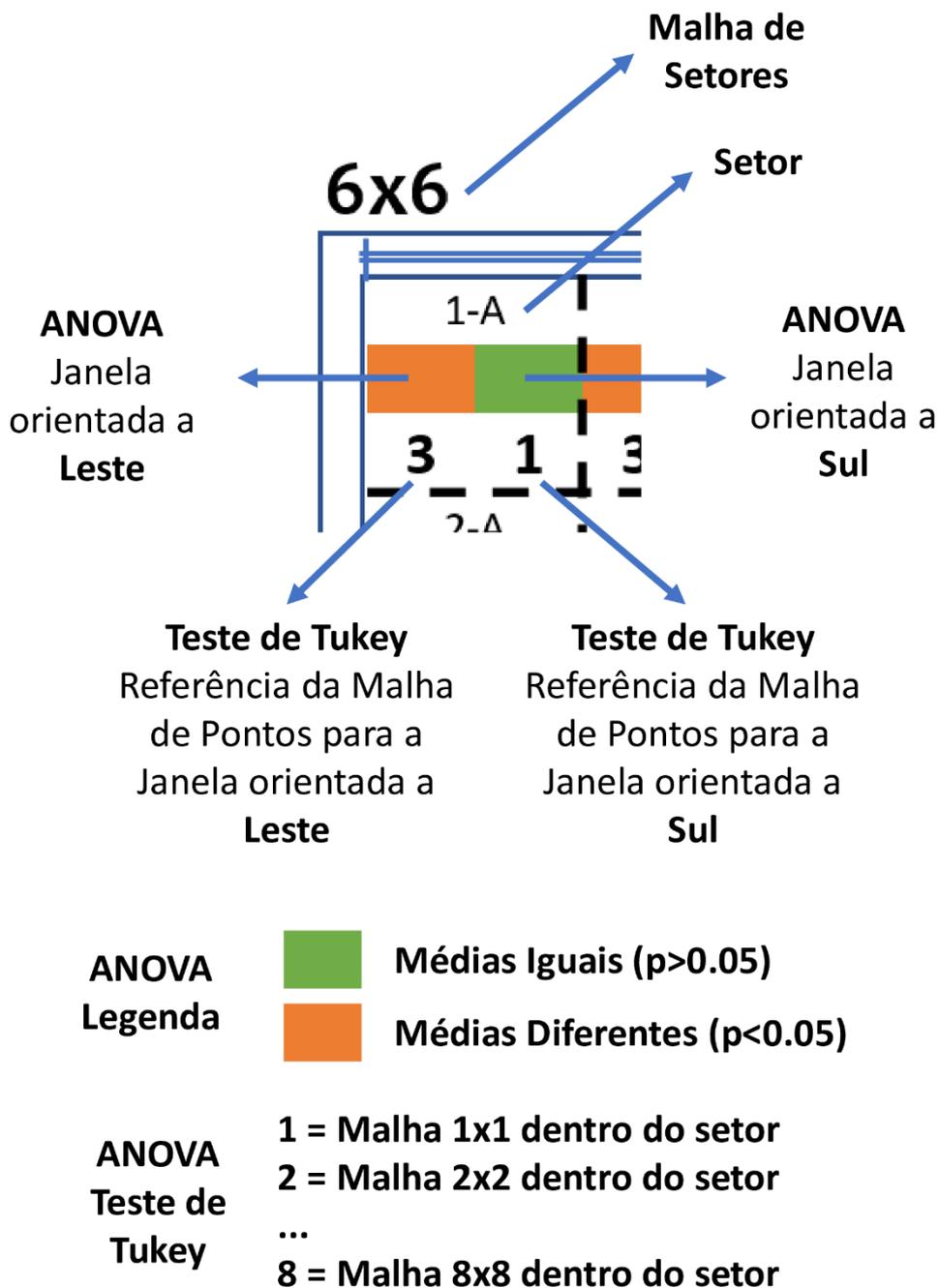
	Índice	ALN	ALNc	ALNe	IULN				ESA
					Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	
Sul	Malha	2x2	2x2	9x9	-(1)	6x6	2x2	5x5	-(1)
	Área	4,00	4,00	0,36	-	0,75	4,00	1,00	-
Leste	Malha	2x2	2x2	7x7	-(1)	5x5	4x4	7x7	11x11
	Área	4,00	4,00	0,56	-	1,00	1,44	0,56	0,25

(1) Inconclusivo com as análises realizadas

APÊNDICE 5 - Resultados da Análise de Variância e Teste de Tukey a iluminação e suas componentes

Nesse apêndice são apresentados os resultados de forma esquemática para as análises de variância e teste de Tukey realizados nas componentes de céu direto (CD), sol direto (SD) e a componente direta total (CD+SD) da Figura 81 à Figura 89; e as componentes de céu refletido (CR), sol refletido (SR) e a componente refletida total (CR+SR) da . A forma como os dados serão apresentados está descrita na Figura 77.

Figura 77 - Forma de apresentação dos resultados da Análise de Variância e Teste de Tukey



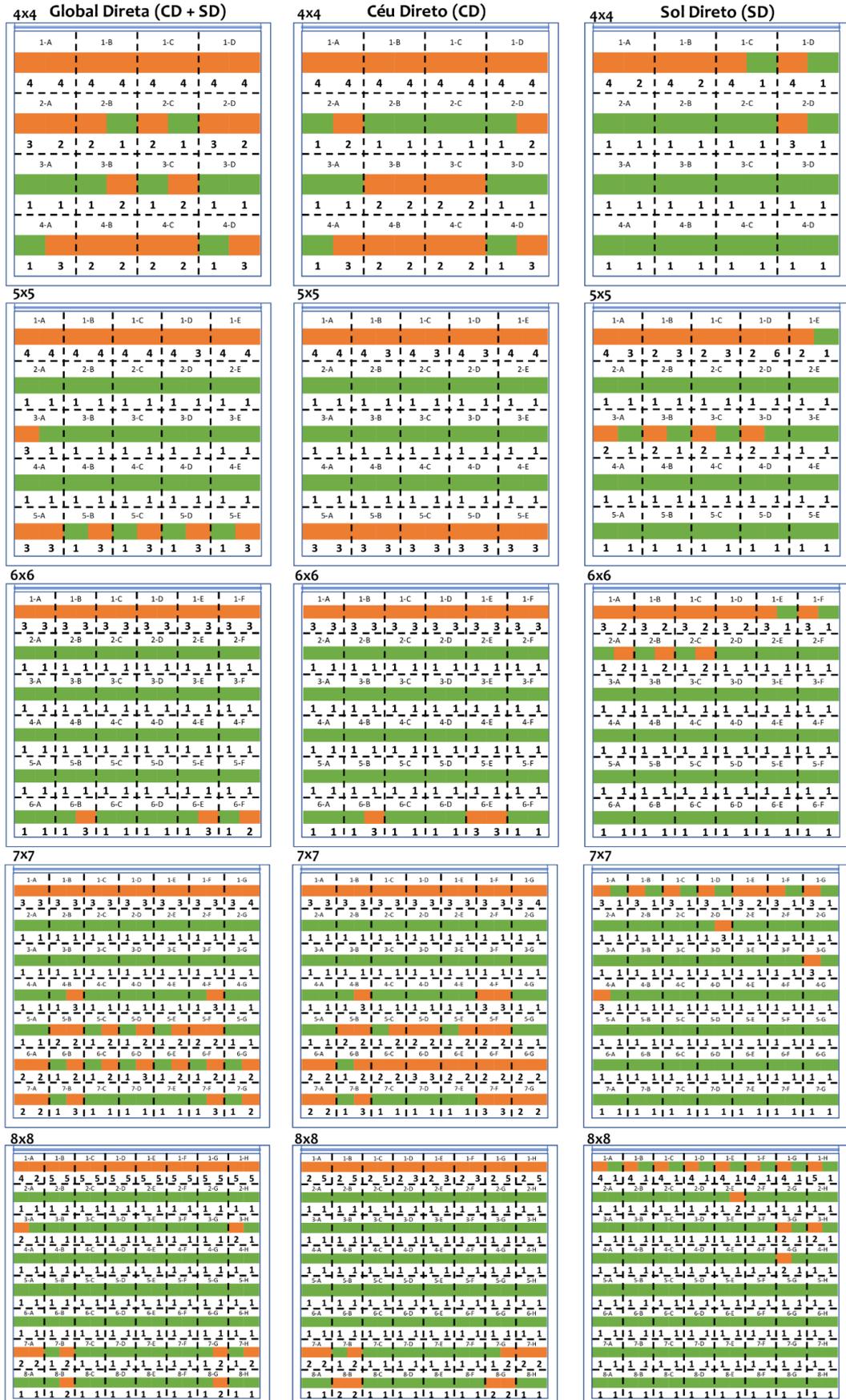
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 78 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Macapá, com obstrução de entorno 0



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 79 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Macapá, com obstrução de entorno 45T



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 80 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Macapá, com obstrução de entorno 45F



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 81 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 0



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 82 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 45T



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 83 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 45F



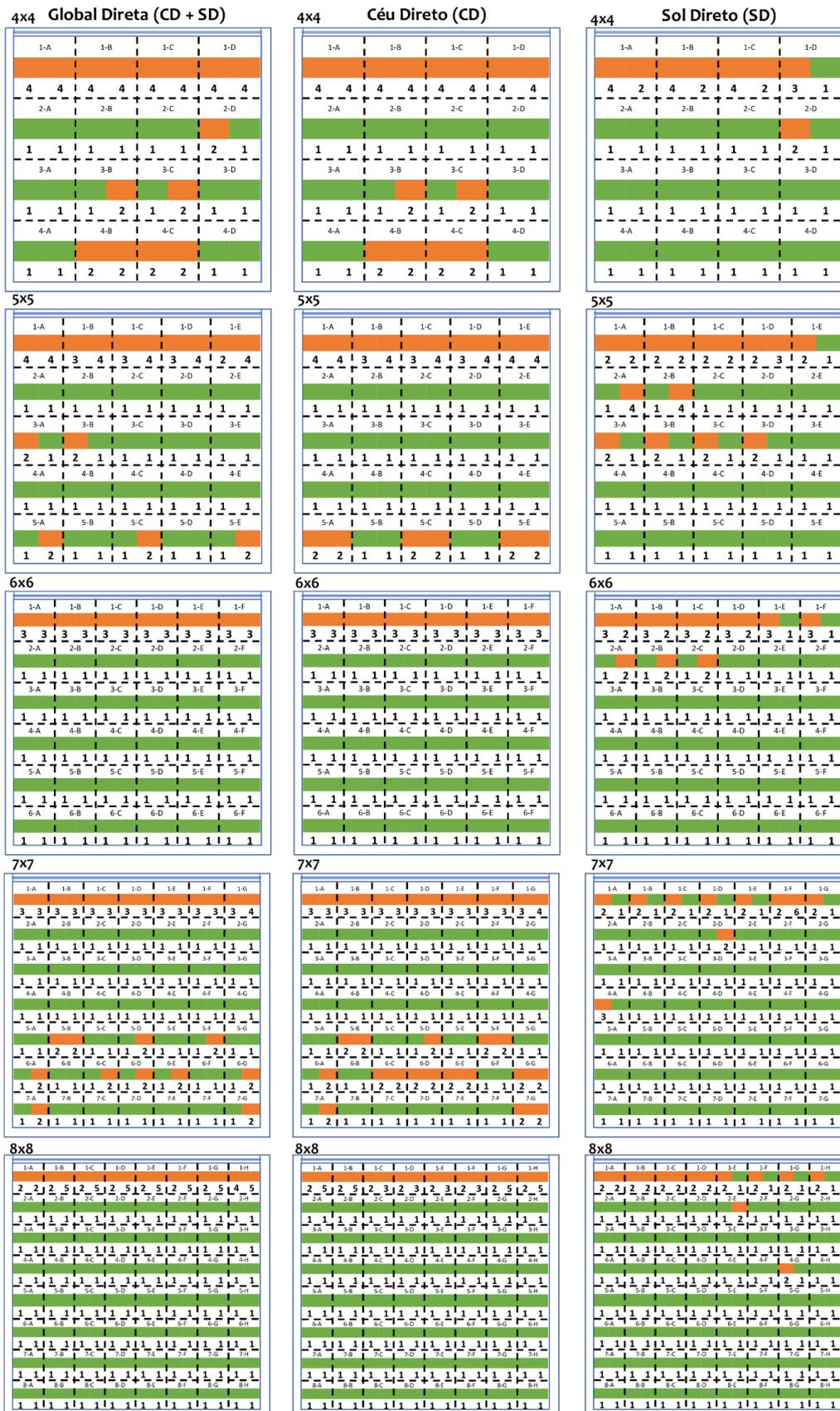
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 84 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Vitória, com obstrução de entorno 0



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 85 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Vitória, com obstrução de entorno 45T



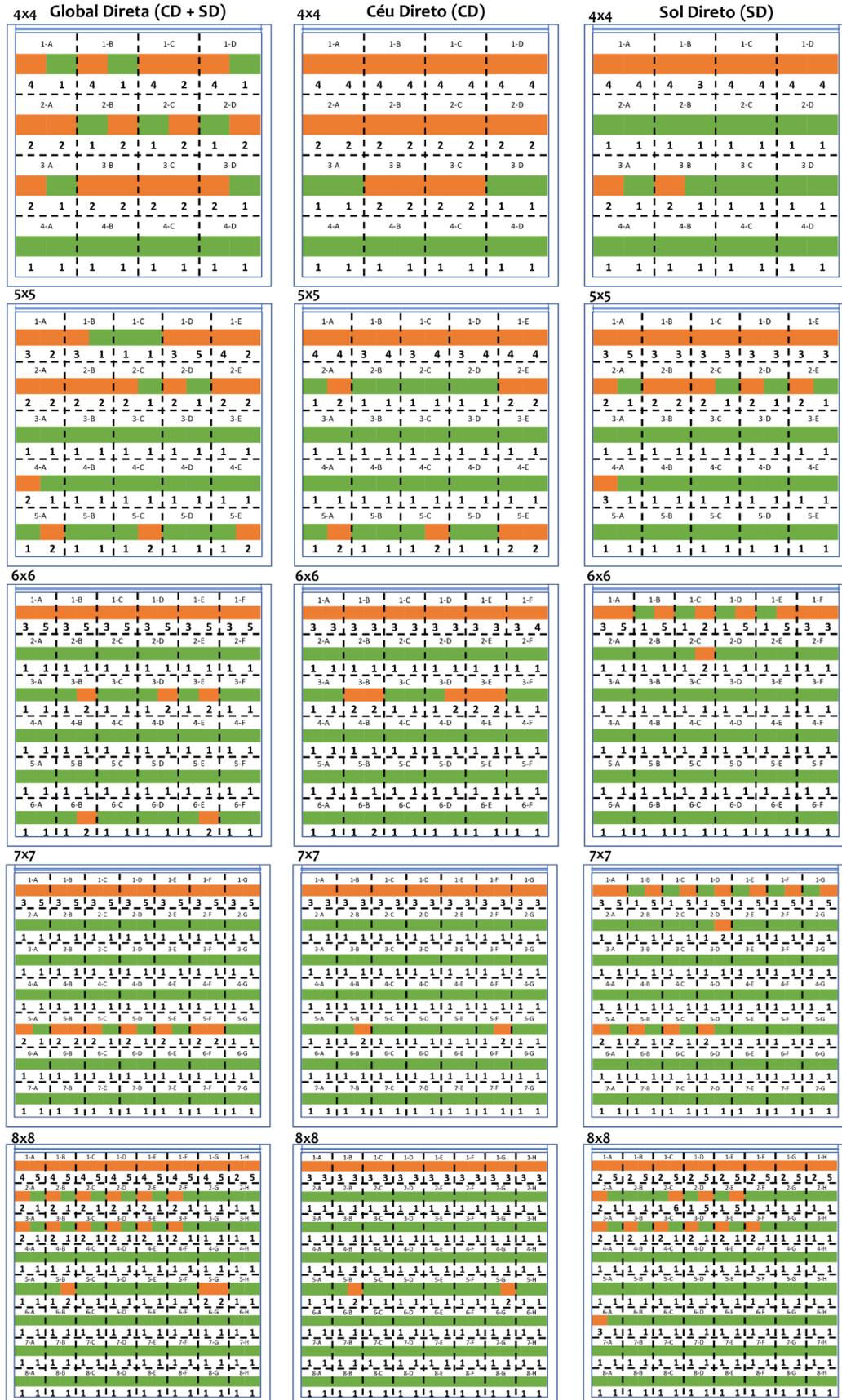
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 86 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Vitória, com obstrução de entorno 45F



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 87 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 0



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 88 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 45T



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 89 - Resultados da iluminância global direta e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 45F

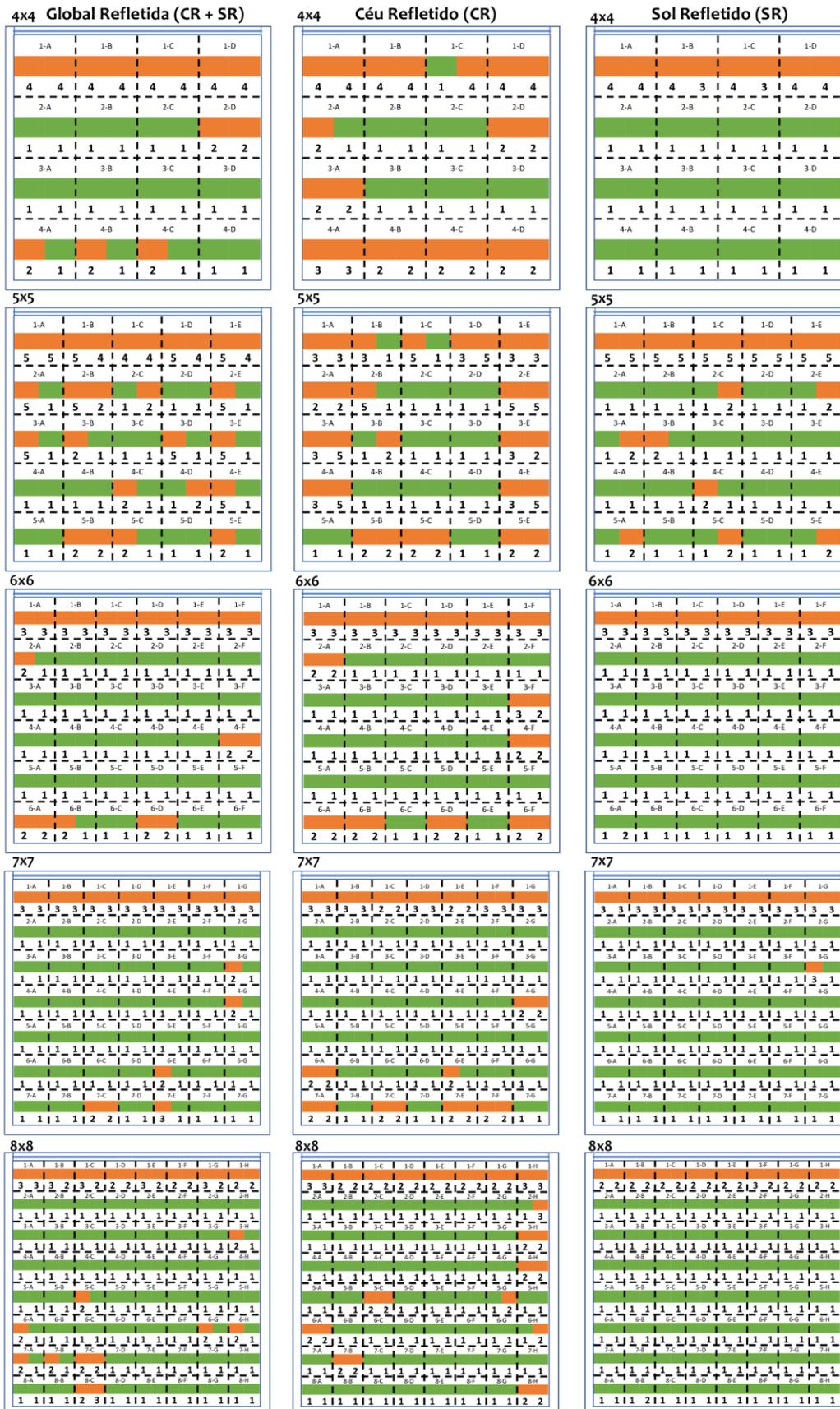


Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 90 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Macapá., com obstrução de entorno 0

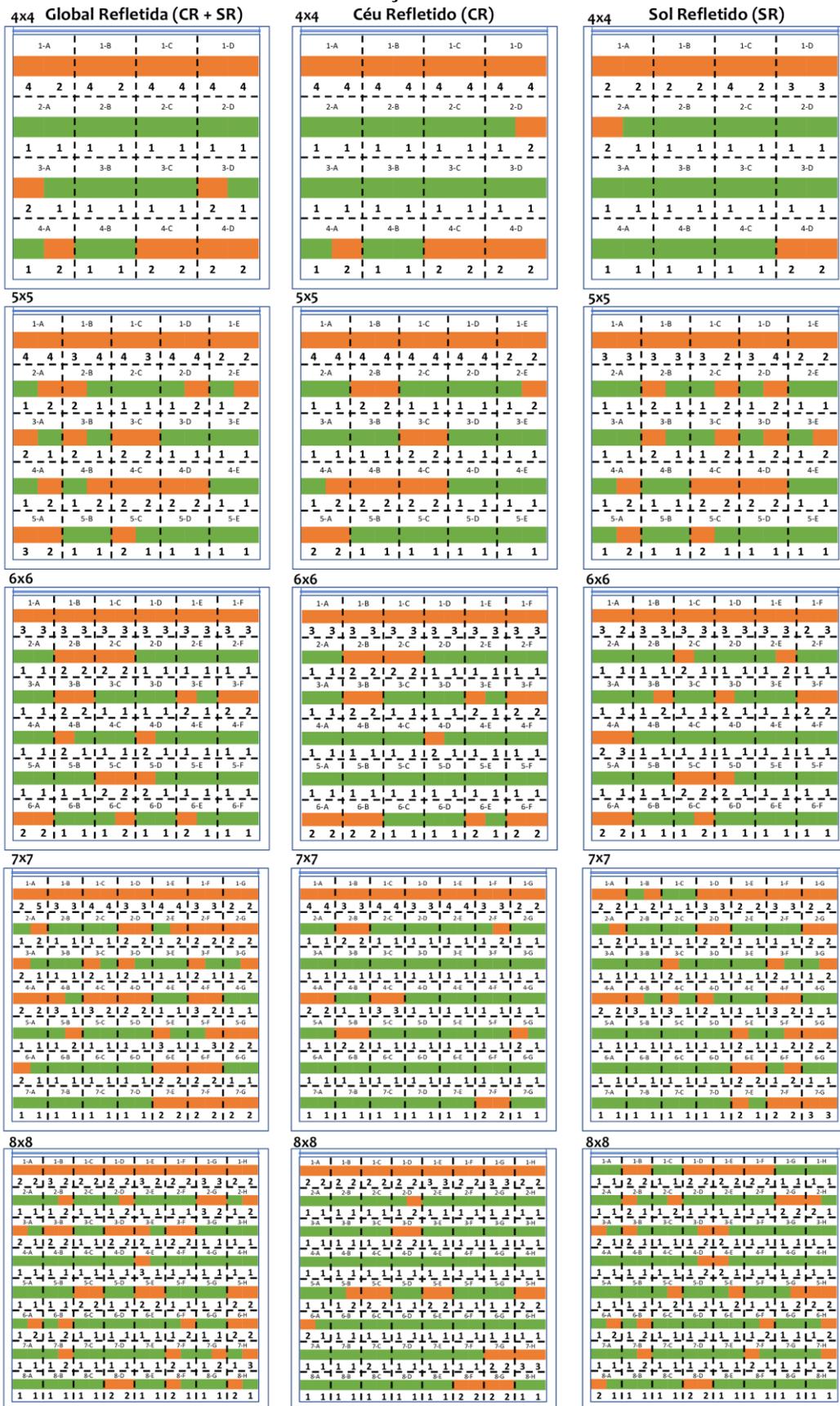


Figura 91 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Macapá., com obstrução de entorno 45T



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 92 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Macapá., com obstrução de entorno 45F



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 93 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Macapá., com obstrução de entorno 90



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 94 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 0



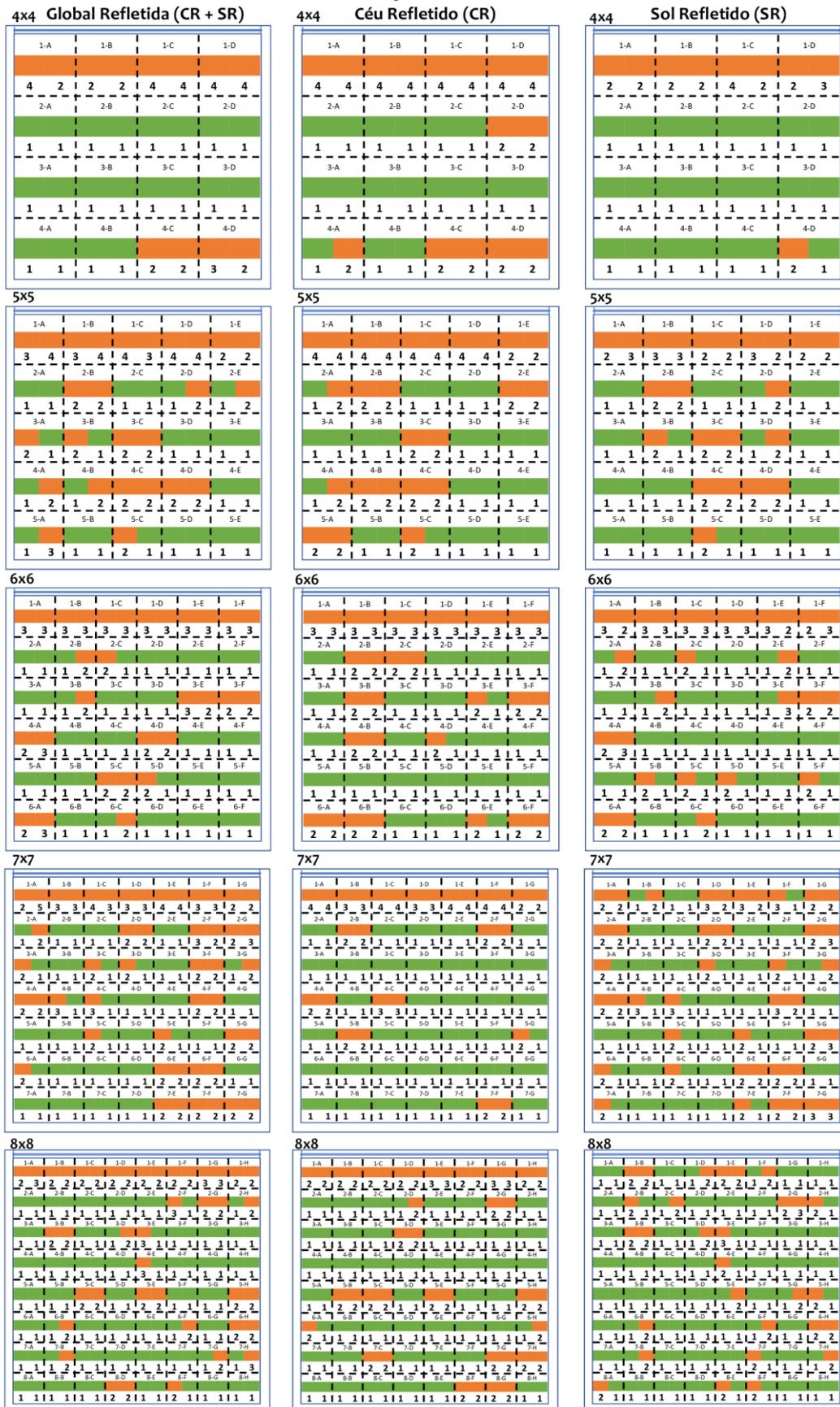
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 95 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 45T



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 96 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 45F



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 97 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Maceió, com obstrução de entorno 90



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 98 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Vitória, com obstrução de entorno 0



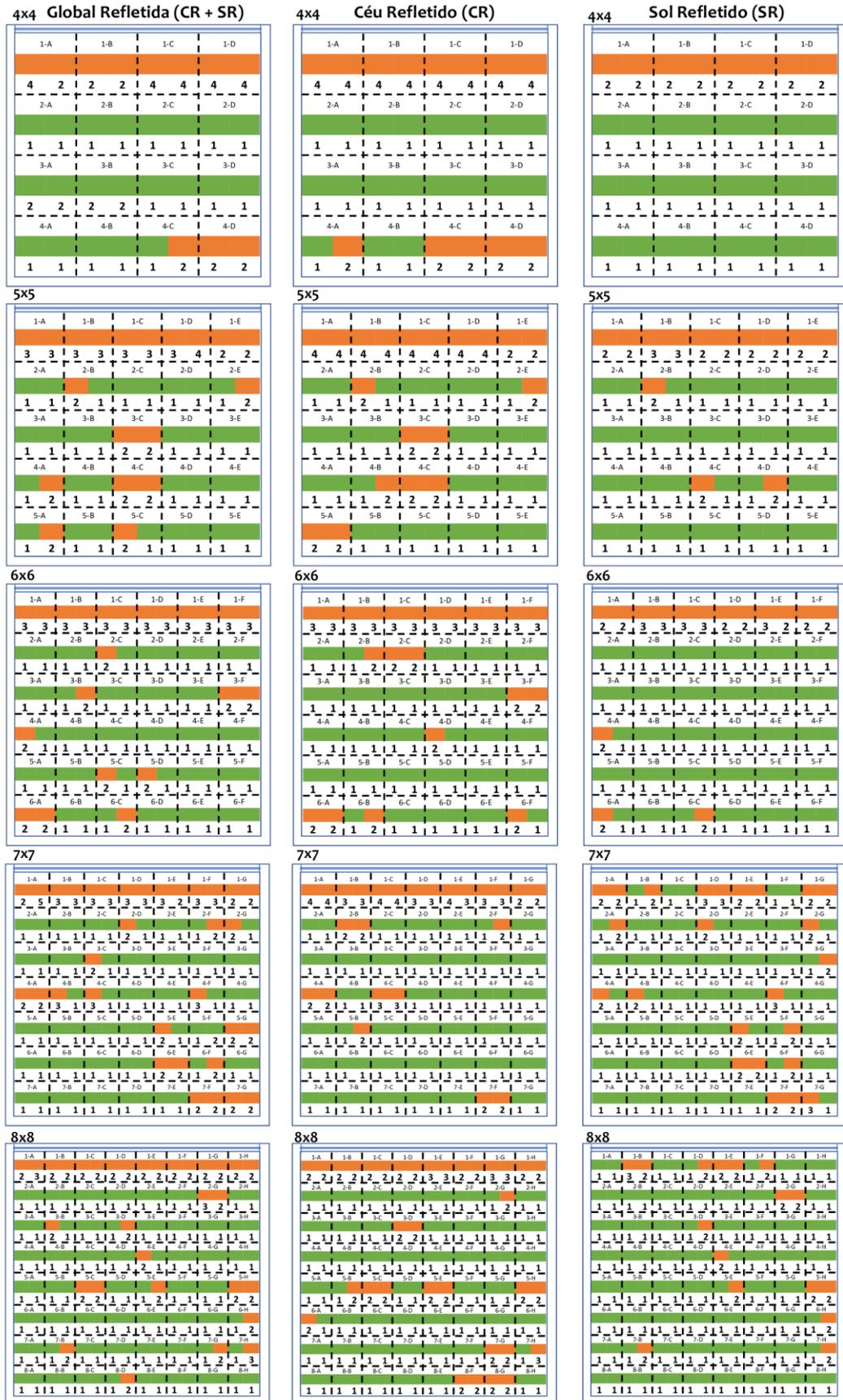
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 99 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Vitória, com obstrução de entorno 45T



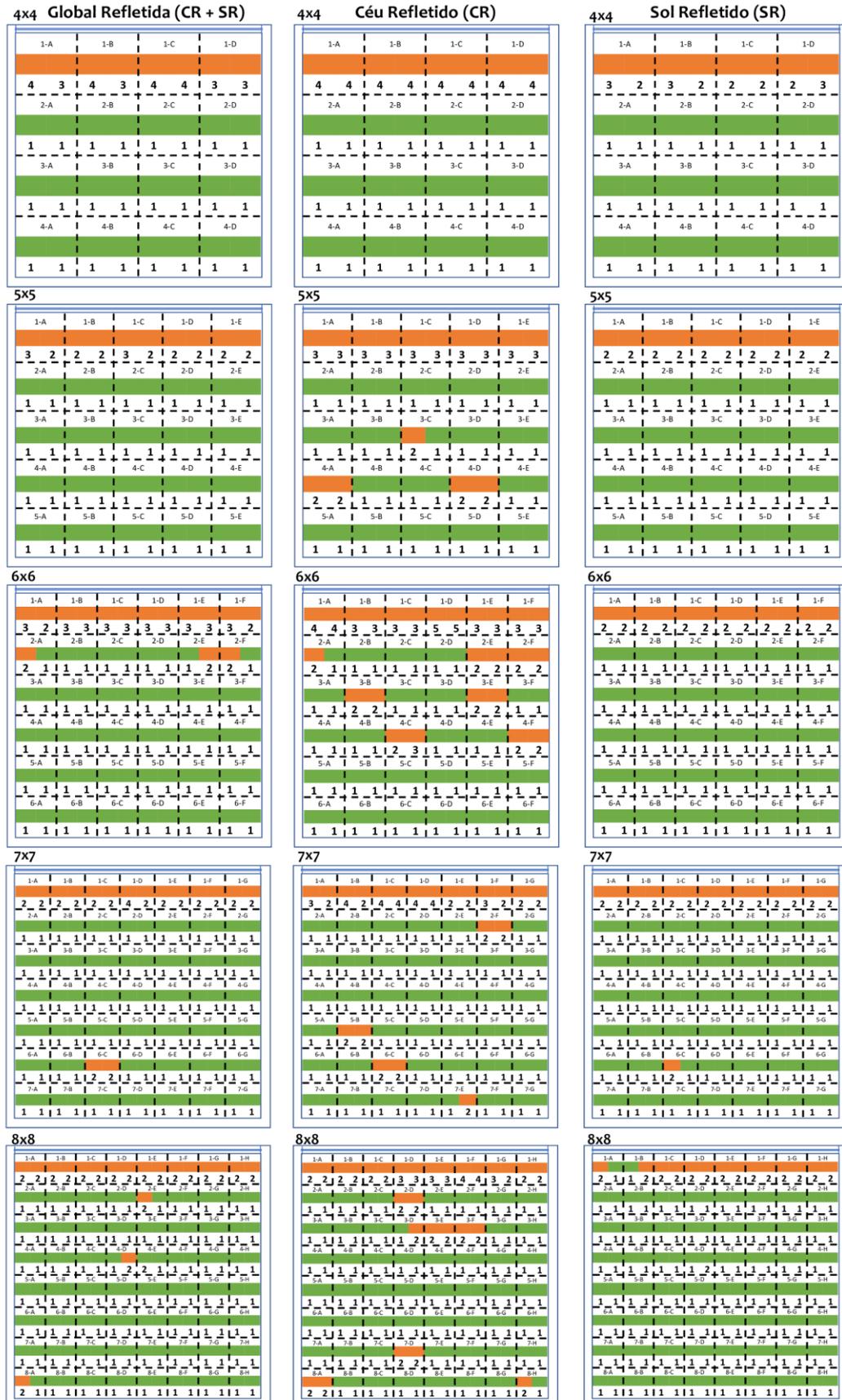
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 100 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Vitória., com obstrução de entorno 45F



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 101 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Vitória., com obstrução de entorno 90



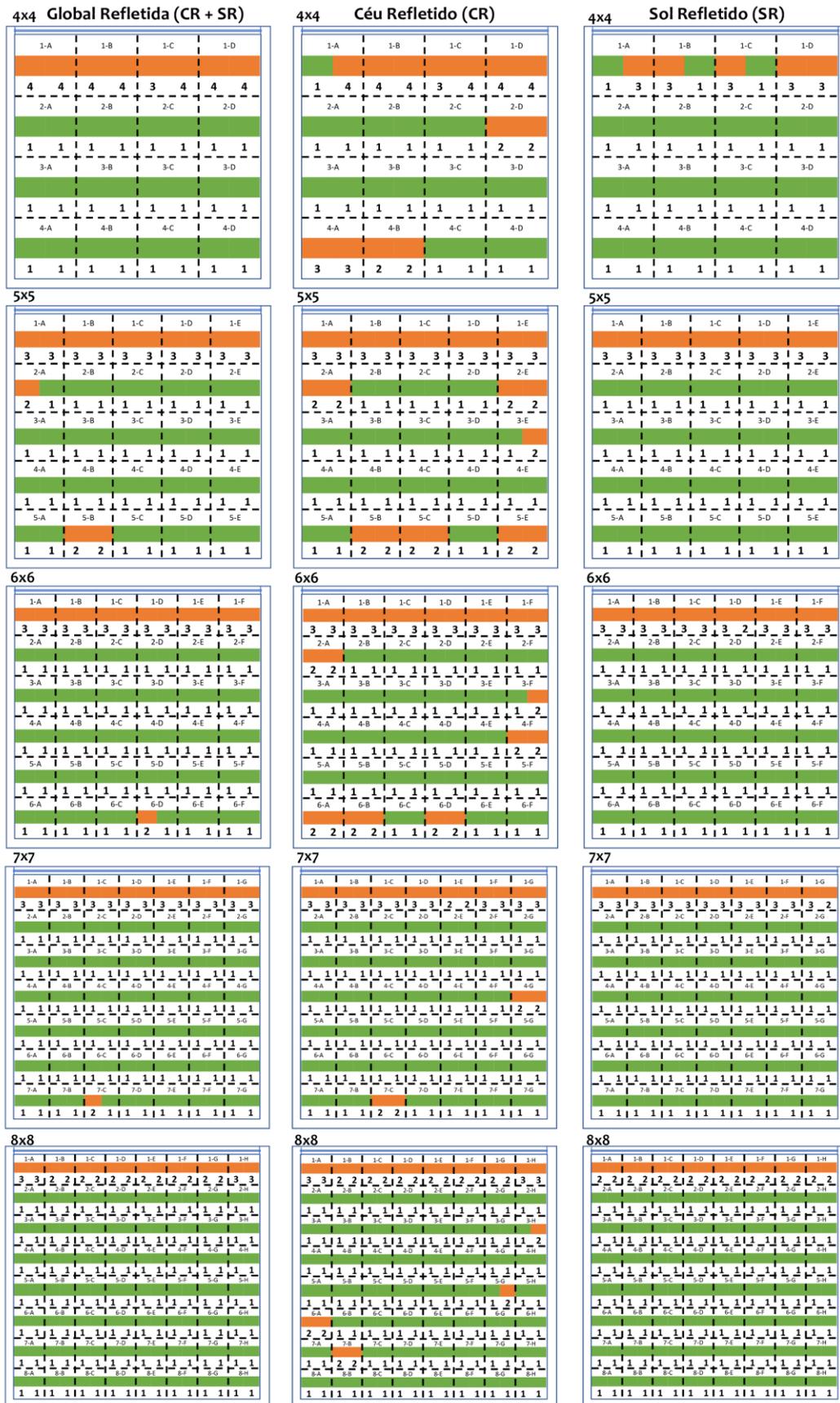
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 102 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 0



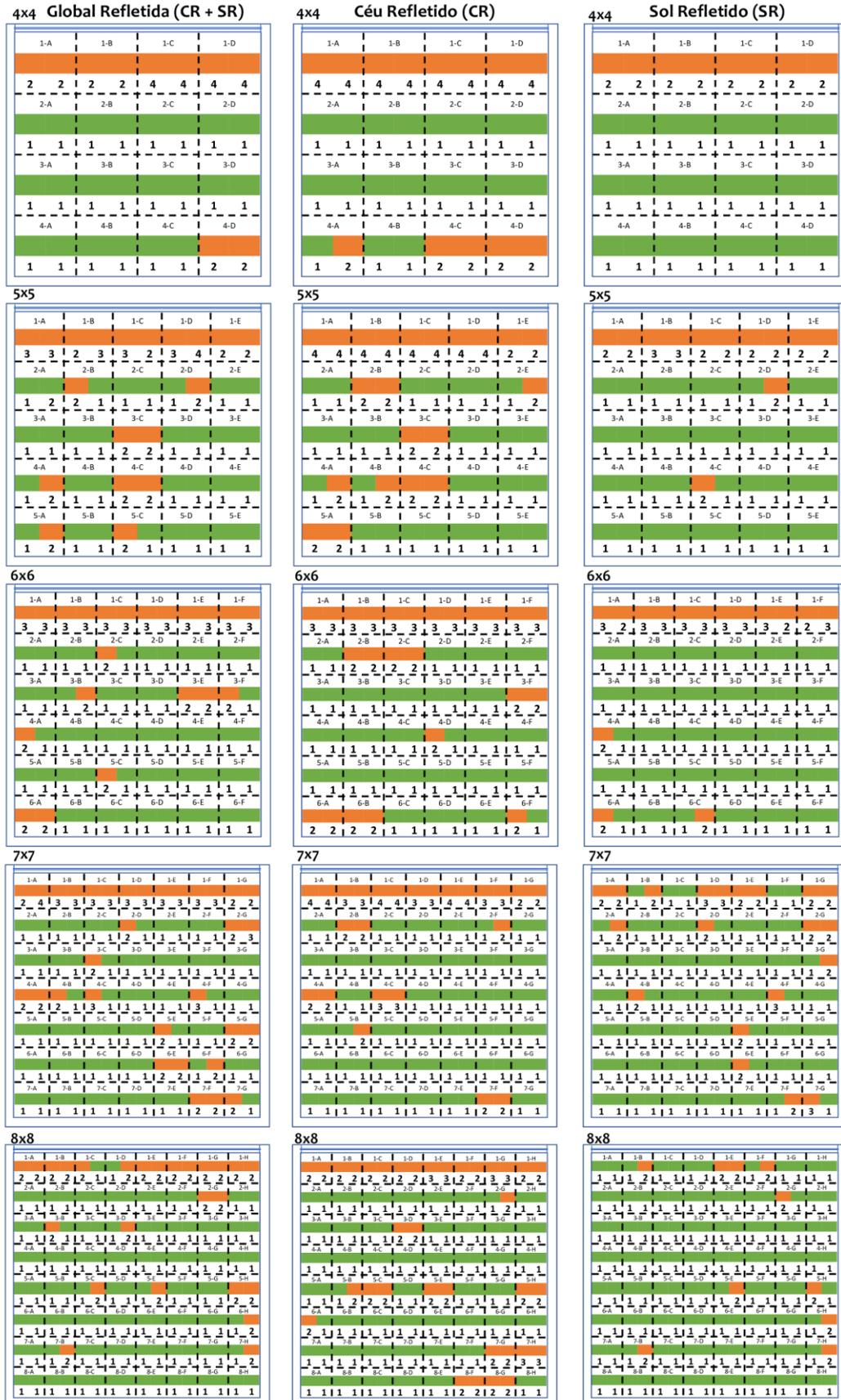
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 103 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 45T



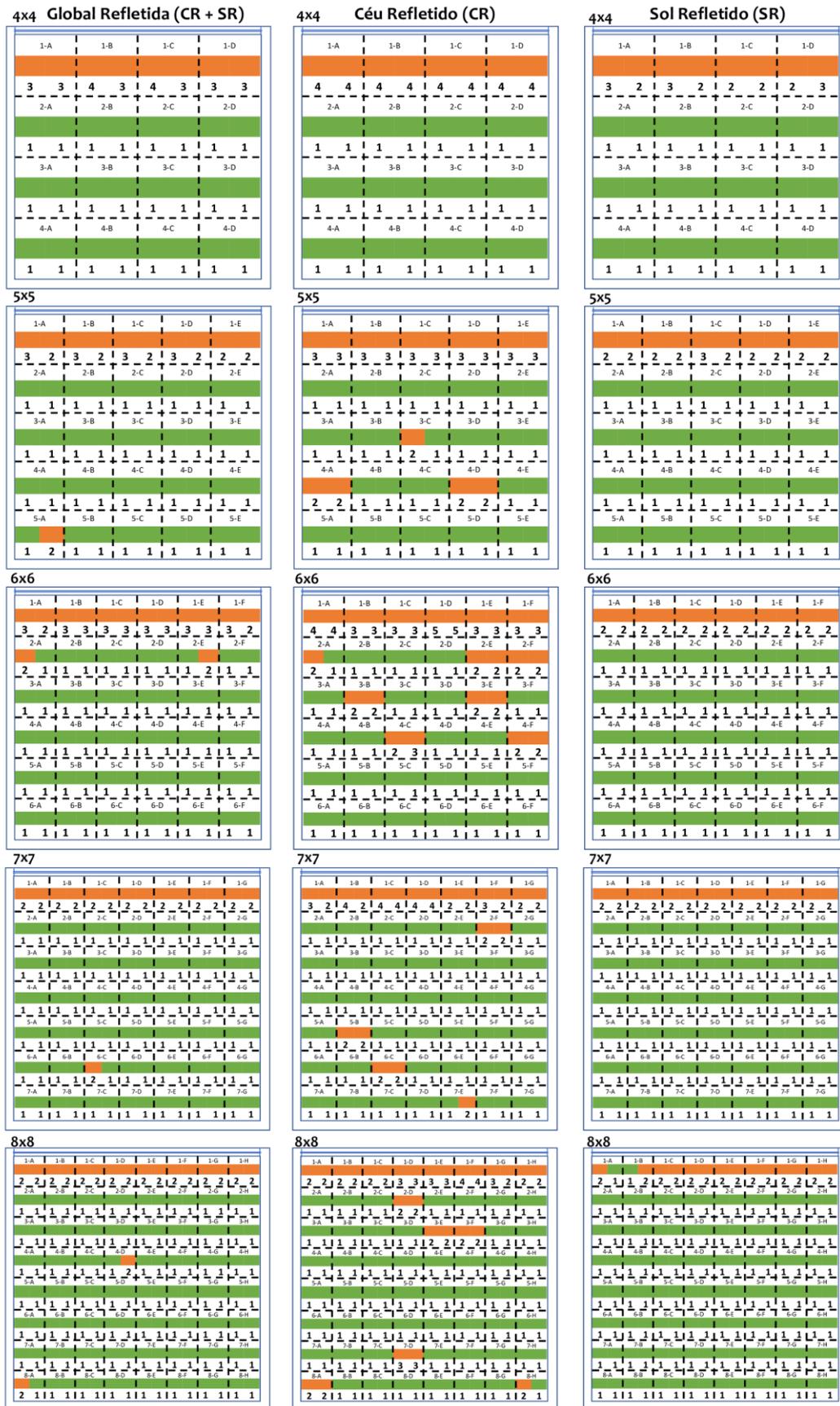
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 104 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 45F



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 105 - Resultados da iluminância global refletida e componentes para a cidade de Porto A., com obstrução de entorno 90



Fonte: Elaborada pelo autor