



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Franciele Fontana da Rosa

**Influência da Geometria Urbana e da Visibilidade de Céu no Desempenho Lumínico  
Anual de Ambientes Internos**

Florianópolis  
2021

Franciele Fontana da Rosa

**Influência da Geometria Urbana e da Visibilidade de Céu no Desempenho Lumínico  
Anual de Ambientes Internos**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo (PósARQ) da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre *strictu sensu* em 2021.

Orientador: Prof. Veridiana Atanasio Scalco, Dra.

Coorientador: Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rosa, Franciele Fontana da  
Influência da geometria urbana e da visibilidade de céu  
no desempenho lumínico anual de ambientes internos /  
Franciele Fontana da Rosa ; orientador, Veridiana  
Atanasio Scalco, coorientador, Fernando Oscar Ruttkay  
Pereira, 2021.  
202 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Iluminação Natural. 3.  
Geometria Urbana. 4. Visibilidade de Céu. I. Scalco,  
Veridiana Atanasio. II. Pereira, Fernando Oscar Ruttkay.  
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Franciele Fontana da Rosa

**Influência da Geometria Urbana e da Visibilidade de Céu no Desempenho  
Lumínico Anual de Ambientes Internos**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Fernando Simon Westphal, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Avaliador Interno

Prof.(a) Raphaela Walger Fonseca, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Avaliador Externo

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi  
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

---

Prof. Paolo Colosso, Dr.  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof.(a) Veridiana Atanasio Scalco, Dra.  
Orientador(a)

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Veridiana Scalco, por toda disponibilidade, contribuição, apoio e dedicação ao longo de todo o período e, principalmente, por acreditar no potencial do meu trabalho.

Ao meu coorientador, Fernando Oscar Ruttkay Pereira, por toda a disponibilidade, dedicação e por acreditar no meu trabalho. Agradeço também pela oportunidade de fazer parte de um grupo de pesquisa de grande responsabilidade e de um dos projetos mais desafiadores da minha vida que me trouxe tantos aprendizados.

À banca examinadora por aceitar avaliar o trabalho e pelas contribuições ao documento na qualificação.

À CAPES pelo apoio financeiro ao longo do último ano do mestrado, que viabilizou a presente pesquisa.

Ao grupo de pesquisa de iluminação da revisão da ABNT/NBR 15.575: Fernando, Veridiana, Raphaela, Natalia G., Natalia N. e Pedro por todas as contribuições em nossas reuniões semanais. O nosso trabalho em equipe foi um dos pontos que mais me incentivou nesta jornada.

A todos os colegas do LABCON/UFSC por compartilhar diariamente conhecimento, alegrias e as angústias da vida acadêmica. Vocês tornaram todo o dia a dia de pesquisa no laboratório mais leve e divertido. Agradeço especialmente à Natalia Nome e Pedro Mariano por me ajudarem e me ensinarem muito do que eu sei hoje sobre modelagem paramétrica e o software Rhinoceros/Grasshopper.

À Fabiola, Leandra, Jéssica e Larissa por serem mais do que colegas de mestrado, mas terem se tornado grandes amigas. O apoio e parceria de vocês foi fundamental na minha trajetória. Tenho certeza de que vou levar nossa amizade para a vida toda.

Por fim, mas não menos importante, agradeço e dedico este trabalho à minha família que sempre apoiou todos os meus sonhos incondicional e incontestavelmente. Vocês são meus maiores exemplos e a razão por eu buscar me tornar um ser humano melhor a cada dia.

## RESUMO

Nos últimos anos, o adensamento urbano é visto como alternativa para crescimento sustentável das cidades. Entretanto, com mudanças de planos diretores e a pressão econômica do setor imobiliário o que se tem notado é um crescimento desordenado das cidades resultando em uma geometria urbana heterogênea. O contexto urbano é um dos fatores que tem maior influência no desempenho lumínico do ambiente interno. Os planos diretores são os instrumentos regulatórios que definem as características para um crescimento urbano controlado das cidades. Adicionalmente, diversos textos normativos vêm detalhando cada vez mais como o entorno deve ser considerado nas análises de desempenho de edificações. É interessante que existam formas simplificadas de se realizar estas análises visto que esse processo quando realizado por meio de simulação computacional se torna muito mais complexo. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da geometria urbana e da visibilidade de céu no desempenho lumínico anual de ambientes internos com base em dados climáticos padronizados. Este estudo foi dividido em quatro etapas. Na primeira foi realizada uma análise do conceito de visibilidade de céu com base na definição de ângulos estudados em pesquisas anteriores. Na segunda, foi analisada a distribuição da radiação solar na abóboda celeste com base em dados climáticos padronizados para diferentes localidades e orientações solares. Na terceira, foram criados cenários urbanos obstruindo diferentes parcelas de céu buscando analisar o comportamento luminoso no ambiente interno. Por fim, na quarta etapa, buscou-se encontrar um parâmetro simplificado que represente um cenário urbano com obstruções de diferentes características. Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o *software* Rhinoceros/Grasshoper juntamente com o *plug-in* DIVA e LadyBug. Como resultados observou-se que parâmetros como a refletância externa afetam diretamente os resultados obtidos. Ainda, identificou-se, por meio dos dados climáticos, que há grande diferença na distribuição e na intensidade da radiação solar dependendo da localidade e orientação solar. Concluiu-se que a variabilidade da geometria urbana ocasionada pela diferença e alturas e existência de vazios urbanos permite um ganho significativo na iluminação natural do ambiente interno se comparado a geometrias contínuas. Identificou-se que áreas com edificações mais altas, mas com uma parcela considerável de vazios urbanos, podem resultar em um comportamento luminoso semelhante ao de uma obstrução contínua mais baixa.

**Palavras-chave:** Iluminação Natural. Geometria Urbana. Visibilidade de Céu.

## ABSTRACT

In recent years, urban density has been seen as an alternative for sustainable growth in cities. However, with changes in master plans and economic pressure from the real estate sector, what has been noticed is a disorderly growth of cities resulting in a heterogeneous and unpredictable urban geometry. The urban context is one of the factors that has the greatest influence on the daylighting performance of the indoor environment. Master plans are the regulatory instruments that define the characteristics for a controlled urban growth of cities. In addition, several normative texts are increasingly detailing how the urban environment should be considered in building performance analysis. It is interesting that there are simplified ways to carry out these analyzes since this process, when carried out by computer simulation, becomes much more complex. The aim of this work was to analyze the influence of urban geometry and sky visibility on the annual daylighting performance of indoor environments based on climatic data. The framework of this study was divided into four stages. In the first, an analysis of the concept of sky visibility was performed based on the definition of angles studied in previous research. In the second, the distribution of solar radiation in the celestial dome was analyzed based on climatic data for different locations and solar orientations. In the third, urban scenarios were created obstructing different patches of the sky in order to analyze the luminous behavior in the indoor environment. Finally, in the fourth stage, a simplified parameter was defined that represents an urban scenario with obstructions that have different characteristics. For the development of the work, the Rhinoceros / Grasshopper software was used together with the plug-in DIVA and LadyBug. As a result, it was observed that parameters such as external reflectance and the number of inter-reflections directly affect the results obtained. Moreover, it was identified, through climatic data, that the distribution and intensity of solar radiation depending on the location and solar orientation is very variable. It was concluded that the variability of urban geometry caused by the difference and heights and the existence of urban voids can lead to a significant increase in the natural light of the indoor environment. It was identified that areas with higher buildings, but with a considerable portion of urban voids, can result in a luminous behavior similar to that of a lower continuous obstruction.

**Key Words:** Daylight. Urban Geometry. Sky Visibility.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Porção de céu identificada no plano vertical (a'b'c'd') e no plano horizontal (a''b''c''d'') .....	26
Figura 2 - Ângulo de Obstrução Vertical .....	27
Figura 3 - Ângulo de Visão de Céu .....	27
Figura 4 - Linha de não visão do céu .....	27
Figura 5a - Relação das variáveis da linha de céu não visível em planta baixa .....	28
Figura 6 - Ângulos verticais e horizontais definidos pela Janela de Céu Preferível ..	30
Figura 7 - Obstruções propostas no estudo JCP .....	31
Figura 8 - Modelo de Céu Preferível proposto pela JCP .....	32
Figura 9 - Modelo de Céu Remanescente proposto pela JCP .....	32
Figura 10 - Área de Visão Desobstruída .....	33
Figura 11 - Relação entre a altura dos edifícios e a AVD para cada valor de FLDV	34
Figura 12 - Coeficiente DC para uma superfície vertical .....	37
Figura 13 - Coeficiente DC para uma superfície horizontal em um ambiente interno .....	37
Figura 14 - Tabela de valores de refletância recomendados .....	40
Figura 15 - Tipologias de salas de aula .....	40
Figura 16 - Comparação entre os resultados obtidos para DA <sub>300</sub> .....	41
Figura 17 - Média e o desvio padrão e coeficiente de variação para os resultados de TAI e DA <sub>300</sub> obtidos a partir de diferentes instrumentos regulatórios .....	42
Figura 18 - Dimensões do ambiente analisado em planta (esquerda) e corte (direita) .....	43
Figura 19 - Tipologias de obstrução utilizadas no estudo e ângulos de obstrução vertical utilizados .....	43
Figura 20 - Resultados obtidos para DF <sub>avg</sub> .....	44
Figura 21 - Resultados obtidos para SSA .....	45
Figura 22 - Análise de correlação entre os indicadores SSA e DF <sub>ave</sub> .....	46
Figura 23 - Cenários urbanos genéricos uniformes, piramidal e randômico, respectivamente .....	46
Figura 24 - Áreas urbanas utilizadas no estudo .....	47
Figura 25 - Domos gerados para um período anual e mensal (janeiro e julho) .....	48

Figura 26 - Resultados de radiação direta (azul), difusa (laranja e refletida (cinza) e sua relação com SVF (linha) .....	49
Figura 27 - Resultados de correlação para radiação difusa (magenta), global (azul), direta (vermelho) e refletida (ciano).....	51
Figura 28 - Tipologias urbanas utilizadas e dados de entrada das simulações.....	52
Figura 29 - Variações de altura de acordo com o índice FAR para cada tipologia....	54
Figura 30 - Resultados obtidos para as diferentes tipologias .....	55
Figura 31 - Resultados de correlação entre desempenho e luz natural e balanço energético.....	56
Figura 32 - Conceito utilizado para otimização da forma urbana .....	57
Figura 33 - Tipologias de quadra utilizadas na otimização do estudo .....	58
Figura 34 - Resultados obtidos para índice de aproveitamento igual a 1,3.....	59
Figura 35 – Resultados obtidos para índice de aproveitamento 3,0.....	60
Figura 366 - Evolução das tipologias de blocos utilizados com resultados das simulações computacionais geradas .....	62
Figura 37 - Relação sDA e FAR .....	63
Figura 388 - Média diária da distribuição da radiação no ambiente urbano .....	64
Figura 399 - Níveis de iluminação natural anual acima de 1000 lux .....	64
Figura 40 - Níveis de iluminação natural anual acima de 500 lux .....	65
Figura 41 - Distribuição de iluminação natural no interior do ambiente .....	65
Figura 42 - Céu Desobstruído .....	71
Figura 43 - Céu Preferível.....	71
Figura 44 - Céu Remanescente.....	71
Figura 45 - Ambiente interno de análise .....	72
Figura 46 - Carta Solar Curitiba .....	73
Figura 47 - Carta Solar Brasília .....	73
Figura 48 - Carta Solar Belém .....	73
Figura 49- Subdivisão da abóboda celeste proposta por Tregenza .....	75
Figura 50 - Desenho ilustrativo dos ângulos utilizados para o cálculo da radiação incidente .....	76
Figura 51 – Representação em Corte do Cenário de Obstrução Contínua - Afastamento 5m.....	78
Figura 52 - Representação em Corte do Cenário de Obstrução Contínua - Afastamento 15m.....	79

Figura 53 - Obstrução Representação em Corte do Cenário de Obstrução Contínua - Afastamento 30m.....	80
Figura 54 - Cenários Irregulares com Espaços Vazios Frontais .....	85
Figura 55 - Cenários Irregulares com Espaços Vazios Laterais.....	86
Figura 56 - Ilustração da proposta de simplificação da geometria urbana.....	90
Figura 57 - Determinação do Ângulo de Obstrução Vertical.....	92
Figura 58 - Setorização das células para Fachada Norte.....	94
Figura 59 - Setorização das células para Fachada Sul.....	94
Figura 60 - Setorização das células para Fachada Leste .....	94
Figura 61 - Setorização das células para Fachada Oeste.....	94
Figura 62 - Análise das obstruções em planta baixa .....	95
Figura 63 - Análise das obstruções em corte.....	95
Figura 64 - Análise das obstruções em corte.....	95
Figura 65 – Equivalência entre Cenário Real/Irregular X Cenário Simplificado - Ângulo de Obstrução Vertical Representativo .....	97
Figura 66 - Comparação entre Resultados de sDA <sub>200/50%</sub> .....	100
Figura 67 - Comparação entre Resultados de sDA <sub>200/50%</sub> considerando a Orientação Solar.....	101
Figura 68 – Percentual de Radiação dentro da Setor definido pela JCP- Curitiba Sul .....	109
Figura 69 - Percentual de Radiação dentro da Setor definido pela JCP - Brasília Oeste .....	109
Figura 70 - Percentual de Radiação dentro da Setor definido pela JCP - Belém Leste .....	109
Figura 71 - Percentual de Radiação dentro da Setor definido pela JCP - Belém Oeste .....	109
Figura 72 - Contribuição da Radiação Solar - Norte Curitiba.....	113
Figura 73 - Contribuição da Radiação Solar - Sul Curitiba .....	113
Figura 74 - Contribuição da Radiação Solar - Norte Brasília .....	113
Figura 75 - Contribuição da Radiação Solar - Sul Brasília .....	113
Figura 76 - Contribuição da Radiação Solar - Norte Belém .....	113
Figura 77 - Contribuição da Radiação Solar - Sul Belém.....	113
Figura 78 - Contribuição da Radiação Solar - Leste Curitiba .....	114

Figura 79 - Contribuição da Radiação Solar Oeste Curitiba.....	114
Figura 80 - Contribuição da Radiação Solar - Leste Brasília.....	114
Figura 81 - Contribuição da Radiação Solar - Oeste Brasília .....	114
Figura 82 - Contribuição da Radiação Solar Leste Belém .....	114
Figura 83 - Contribuição da Radiação Solar Oeste Belém.....	114
Figura 84 - Exemplo de Representação Gráfica do Zoneamento.....	115
Figura 85 - Comparação entre cenários com afastamento de 5 metros - Valores de Autonomia de Luz Natural ao Longo da Malha de Cálculo.....	117
Figura 86 - Contribuição de Radiação Recebida pela Janela Curitiba .....	121
Figura 87 - Contribuição de Radiação Recebida pela Janela - Brasília .....	122
Figura 88 - Contribuição de Radiação Recebida pela Janela Belém.....	122
Figura 89 - Distribuição de iluminâncias no ponto P ao longo do ano (a) (LV_LE72_LD72).....	125
Figura 90 - Distribuição de iluminâncias no ponto P ao longo do ano (c) (LV_C72_LD72).....	125
Figura 91 - Radiação Incidente na Janela - Curitiba - Norte.....	126
Figura 92 - Radiação Incidente na Janela Curitiba Sul .....	126
Figura 93 - Radiação Incidente na Janela Curitiba Leste.....	126
Figura 94 - Radiação Incidente na Janela Curitiba Oeste .....	127
Figura 95 - Radiação Incidente na Janela Brasília Norte .....	127
Figura 96 - Radiação Incidente na Janela - Brasília Sul.....	127
Figura 97 - Radiação Incidente na Janela - Brasília Leste .....	128
Figura 98 - Radiação Incidente na Janela - Brasília Oeste.....	128
Figura 99 - Radiação Incidente na Janela - Belém Norte.....	128
Figura 100 - Radiação Incidente na Janela Belém Sul.....	129
Figura 101 - Radiação Incidente na Janela Belém Leste.....	129
Figura 102 - Radiação Incidente na Janela Belém Oeste .....	129
Figura 103 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) no Eixo central do Ambiente - Curitiba .....	132
Figura 104 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) no Eixo central do Ambiente - Brasília.....	133
Figura 105 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) no Eixo central do Ambiente - Belém.....	134
Figura 106 - Comparação valores de sDA <sub>200/50%</sub> - Curitiba Norte .....	136

Figura 107 - Comparação valores de sDA200/50% - Curitiba Sul.....	136
Figura 108 - Comparação valores de sDA200/50% - Curitiba Leste.....	136
Figura 109 - Comparação valores de sDA200/50% - Curitiba Oeste .....	136
Figura 110 - Comparação valores de sDA200/50% - Brasília Norte .....	137
Figura 111 - Comparação valores de sDA200/50% - Brasília Sul.....	137
Figura 112 - Comparação valores de sDA200/50% - Brasília Leste .....	137
Figura 113 - Comparação valores de sDA200/50% - Brasília Oeste .....	137
Figura 114 - Comparação valores de sDA200/50% - Belém Norte .....	138
Figura 115 - Comparação valores de sDA200/50% - Belém Sul.....	138
Figura 116 - Comparação valores de sDA200/50% - Belém Leste .....	138
Figura 117 - Comparação valores de sDA200/50% - Belém Oeste .....	138
Figura 118 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) ao Longo do Eixo Central do Ambiente – Brasília Norte.....	141
Figura 119 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) ao Longo do Eixo Central do Ambiente – Brasília Norte.....	150
Figura 120 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Norte.....	162
Figura 121 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Sul.....	163
Figura 122 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Leste .....	165
Figura 123 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Oeste.....	166
Figura 124 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Norte .....	168
Figura 125 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Sul.....	170
Figura 126 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Leste.....	171
Figura 127 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA <sub>200</sub> ) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Oeste .....	172

Figura 128 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Norte.....	173
Figura 129 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Sul.....	174
Figura 130 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Leste .....	175
Figura 131 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Oeste.....	176
Figura 132 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Norte.....	182
Figura 133 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Sul .....	183
Figura 134 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Leste .....	184
Figura 135 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Oeste.....	185
Figura 136 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Norte.....	186
Figura 137 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Sul.....	187
Figura 138 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Leste .....	188
Figura 139 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Oeste.....	189

Figura 140 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Norte.....	190
Figura 141 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Sul .....	191
Figura 142 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Leste .....	192
Figura 143 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Oeste.....	193

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação entre objetivos específicos e procedimentos metodológicos .....	70
Quadro 2 - Dados de entrada da simulação computacional .....	74
Quadro 3 - Definição dos cenários com obstruções irregulares – Lote Vazio .....	82
Quadro 4 - Definição dos cenários com obstruções irregulares - Obstrução Baixa...	83
Quadro 5 - Mapas de Distribuição de Autonomia de Luz Natural.....	102
Quadro 6 - Mapas de Distribuição de Autonomia de Luz Natural - Comparação entre Variações do parâmetro ab .....	105
Quadro 7 - Representação Estereográfica da Distribuição da Radiação Global .....	106
Quadro 8 - Representação Estereográfica da Distribuição da Radiação Direta e Difusa .....	107
Quadro 9 - Mapas da Radiação Solar Incidente no Plano Vertical .....	108
Quadro 10 - Mapas com o Percentual de Radiação em 120° .....	110
Quadro 11 - Mapas com o Percentual de Radiação – Subdivisão em três setores ...	111
Quadro 12 – Percentual de Radiação Obstruída - Relação entre Valores de Radiação e de Autonomia de Luz Natural .....	120
Quadro 13 - Comparação entre Valores de Radiação e Autonomia de Luz Natural	124



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de Compensação Curitiba.....	144
Tabela 2 - Fatores de Compensação Brasília .....	145
Tabela 3 - Fatores de Compensação Belém .....	145
Tabela 4 - Fatores de Redução referentes à Componente Refletida Externa (CRE)	146
Tabela 5 - Definição do Angulo Vertical Representativo .....	147
Tabela 6- Definição do Angulo Vertical Representativo - Brasília .....	178
Tabela 7 - Definição do Angulo Vertical Representativo- Curitiba.....	179
Tabela 8 - Definição do Angulo Vertical Representativo - Belém .....	180

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASE Annual Sunlight Exposure

BIM Building Information Modelling

CAAD Computer-Aided Architectural Design

CBDM Climate Based Daylight Modelling

CEN Commission European de Normalizacion

COE Código de Obras de Edificações

CLTC California Lighting Technology Center

DF Daylight Factor

DMC Daylighting Metrics Committee

DIVA Design Iterate, Validate and Adapt

FCV Fator de Céu Visível

IES Illuminating Engineering Society

JCP Janela de Céu Preferível

LEED - BD+C Leadership in Energy and Environmental Design – Building Design and Construction

LEED - ID+C Leadership in Energy and Environmental Design –Interior Design and Construction

PAF Percentual de Área de Fachada

PDDI Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado

sDA Spatial Daylight Autonomy

UDI Useful Daylight Illuminance

USGBC United States Green Building Council

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	19
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....</b>	<b>21</b>
2.1	ABORDAGEM DA ILUMINAÇÃO NATURAL E DO CONTEXTO URBANO EM TEXTOS NORMATIVOS .....	21
2.2	PARÂMETROS DE ANÁLISE DE ILUMINAÇÃO NATURAL .....	25
<b>2.2.1</b>	<b>Parâmetros de análise de Iluminação Natural no Meio Urbano.....</b>	<b>25</b>
2.2.1.1	Parâmetros Geométricos para Análise de Visibilidade de Céu.....	25
2.2.1.2	Conceitos Propostos para Avaliar a Disponibilidade de Luz Natural.....	28
<b>2.2.2</b>	<b>Parâmetros de Análise de Iluminação Natural no Ambiente Interno.....</b>	<b>34</b>
2.2.2.1	Fator de Luz Diurna ( <i>Daylight Factor</i> - DF) e Iluminância Pontual ( <i>Poin-in-time Illuminance</i> ).....	34
2.2.2.2	Modelagem de Iluminação Natural Baseada no Clima ( <i>Climate Based Daylight Modelling</i> - CBDM) .....	36
2.3	CONTEXTO URBANO E DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES.....	42
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	65
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>69</b>
3.1	AVALIAÇÃO DO CONCEITO DE VISIBILIDADE DE CÉU POR MEIO DE SIMULAÇÕES <i>CLIMATE BASED DAYLIGHT MODELLING</i> (CBDM) .....	71
3.2	ANÁLISE DA RADIAÇÃO SOLAR COM BASE EM ARQUIVO CLIMÁTICO .	74
3.3	OBSTRUÇÃO DE DIFERENTES PARCELAS DO CÉU .....	77
<b>3.3.1</b>	<b>Simulações computacionais de iluminação natural considerando um cenário com obstrução contínua .....</b>	<b>77</b>

3.3.2	<b>Simulações computacionais de iluminação natural considerando um cenário com obstruções irregulares .....</b>	<b>81</b>
3.3.3	<b>Relação entre resultados de simulação e os valores de radiação solar incidente na fachada</b>	<b>88</b>
3.3.4	<b>Análise da componente refletida externa e a influência dos espaços vazios no comportamento luminoso .....</b>	<b>88</b>
3.4	<b>DEFINIÇÃO DE UM PARÂMETRO REPRESENTATIVO PARA SIMPLIFICAÇÃO DE UM CENÁRIO URBANO COM OBSTRUÇÕES IRREGULARES</b>	<b>89</b>
3.4.1	<b>Procedimento para identificação do parâmetro e definição dos fatores de compensação de diferentes parcelas de céu.....</b>	<b>90</b>
3.4.1.1	Definição dos ângulos verticais e horizontais .....	91
3.4.1.2	Posicionamento das edificações e definição dos fatores de compensação.....	92
3.4.1.3	Definição da fórmula do ângulo de obstrução vertical representativo .....	95
3.4.2	<b>Aplicação do procedimento em cenários com obstruções irregulares.....</b>	<b>97</b>
3.5	<b>COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS.....</b>	<b>97</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>99</b>
4.1	<b>RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO CONCEITO DE VISIBILIDADE DE CÉU POR MEIO DE SIMULAÇÕES <i>CLIMATE BASED DAYLIGHT MODELLING</i> (CBDM)..</b>	<b>100</b>
4.2	<b>RESULTADOS DA ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR NA ABÓBODA CELESTE COM BASE EM ARQUIVO CLIMÁTICO .....</b>	<b>105</b>
4.3	<b>RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE ILUMINAÇÃO NATURAL .....</b>	<b>115</b>
4.3.1	<b>Relação entre os resultados de Autonomia de Luz Natural Espacial e Radiação Solar Incidente .....</b>	<b>116</b>
4.3.1.1	Resultados para Cenários com Obstrução Contínua .....	116
4.3.1.2	Resultados para Cenários com Obstruções Irregulares .....	122
4.3.2	<b>Influência da Refletância e dos Vazios Urbanos nos resultados de Autonomia de Luz Natural Espacial.....</b>	<b>130</b>
4.3.2.1	Resultados para Cenários com Obstrução Contínua .....	130

4.3.2.2	Resultados para Cenários com Obstruções Irregulares .....	138
4.4	DEFINIÇÃO DO PARÂMETRO PROPOSTO.....	143
4.4.1	<b>Fatores de compensação e setorização da abóboda celeste.....</b>	<b>143</b>
4.4.2	<b>Aplicação do procedimento a cenários urbanos com obstruções irregulares ...</b>	<b>146</b>
4.5	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS .....	148
5	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>152</b>
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	156
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	156
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>158</b>
	<b>ANEXO A – Distribuição dos valores de Autonomia de Luz Natural (DA<sub>200</sub>) ao longo do Eixo Central do Ambiente – Comparação entre Cenários Irregulares .....</b>	<b>161</b>
	<b>ANEXO B - Definição do Ângulo Vertical Representativo .....</b>	<b>178</b>
	<b>ANEXO C – Análise do Comportamento Semelhante entre Cenários Urbanos Irregulares e de Obstrução Contínua.....</b>	<b>181</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A geometria urbana é um dos principais fatores que afeta o desempenho das edificações (OH; KIM, 2019). Ela está principalmente relacionada à disponibilidade de luz solar e radiação direta nas fachadas dos edifícios. A luz natural é modificada pelo ambiente urbano até incidir no ambiente interno, produzindo diferentes variações que influenciam na realização das atividades visuais (SCALCO, 2010). Áreas urbanas altamente obstruídas são privadas de aproveitamento da luz natural, o que pode comprometer conforto da edificação em relação à iluminação.

Desde o século XIX, as cidades começaram a ter grande importância na vida das pessoas em virtude do surgimento de novas oportunidades de trabalho. Com o aumento do número de habitantes, tornou-se um grande desafio garantir condições mínimas de habitabilidade para as pessoas residirem, trabalharem e estudarem nos centros urbanos (SCALCO, 2010). Em decorrência do crescimento acelerado das cidades, começaram a surgir diversas habitações com condições de iluminação, ventilação e salubridade inadequados (TREGUENZA; MARDALJEVIC, 2018).

Nas últimas décadas, tem-se observado que com o crescimento das cidades e as mudanças geradas nos planos diretores conforme são realizadas novas revisões fazem com que surjam contextos urbanos com características variadas. Além disso, apesar do plano diretor ser o instrumento que garante um crescimento saudável para a cidade, existem interesses de diversas partes envolvidos. Em geral, o setor imobiliário pressiona o setor público para que haja um incremento na área edificada por meio do aumento da altura e taxa de ocupação dos edifícios, visando maior lucro na negociação de imóveis (SCALCO, 2010). Da mesma forma, o poder econômico exerce forte influência sobre o setor da construção civil, priorizando a maximização do volume construído de edificações. Como consequência da densificação dos centros urbanos, o acesso à iluminação e ventilação natural dos ambientes internos é prejudicado. As normas obrigatórias e regulamentos urbanos são implementados e atualizados regularmente buscando garantir condições mínimas com relação a estes aspectos.

Nos últimos anos têm-se discutido como deve ser o urbanismo sustentável e o conceito de cidades compactas surge como a forma ideal. Estudos consideram que serviços, trabalho e moradia devem estar próximos para garantir uma redução na quantidade de infraestrutura

urbana bem como emissão de gases relacionados ao transporte (THOMAS, 2003). Entretanto, há uma dualidade em relação à esta questão. Conceitualmente, para uma cidade ser sustentável, serviços e pessoas devem estar concentradas em localidades com alta densidade para que a sua infraestrutura seja utilizada de maneira racional. Em contraponto, segundo Neuman (2005), para a cidade ser mais agradável de se viver, serviços e pessoas devem estar dispersos em baixas densidades. Segundo um levantamento realizado por Thomas (2003), a maioria das pessoas opta por morar em locais de menor densidade, por serem atraídas por ambientes que oferecem moradias com mais espaço e qualidade, bem como áreas públicas como parques, campos e espaços abertos. Portanto, deve existir um equilíbrio entre a compacidade das cidades e o bom aproveitamento dos recursos naturais para garantir qualidade de iluminação e ventilação natural dos ambientes internos.

O plano diretor é o instrumento regulatório que controla o crescimento e a configuração das cidades. A volumetria da cidade é definida por meio de índices a fim de controlar a densidade da cidade. Entretanto, o que se tem notado é que o parcelamento do solo tem apresentado diversas modificações ao longo do tempo. Isso se deve pelo desmembramento ocasionado pelo processo da compra e venda de lotes por parte do setor privado. Com isso o espaço urbano se torna heterogêneo e descontínuo. Além disso, as mudanças nos textos normativos realizadas regularmente apresentam muitas adaptações sequenciais com falta de conexão entre si, o que se reflete em um espaço urbano com geometrias irregulares. Atrelado a isso, diversas normativas que definem parâmetros para habitabilidade das edificações estão começando a avaliar o contexto urbano por meio de medidas mais realistas e vem incorporando definições de como avalia-lo em seus textos.

No âmbito internacional, em 2018, foi reformulada a norma europeia prEN 17037:2018 – *Daylight in buildings* (CEN, 2018) visando aperfeiçoar a forma como a iluminação natural deve ser avaliada em ambientes internos. A nova abordagem de avaliação considera o período anual baseado em dados climáticos padronizados. Essa abordagem é realizada por simulação computacional utilizando a Modelagem da Iluminação Natural Baseada no Clima (*Climate-Based Daylight Modelling- CBDM*), que proporciona uma avaliação do desempenho luminoso no interior de edificações de forma mais realista e condizente às variações temporais do céu e do sol (PEREIRA, FONSECA, SCALCO, 2017). Sua determinação é feita com base na ocorrência anual de valores absolutos de iluminância, estimada a partir de arquivos climáticos padronizados (MARDALJEVIC, J.; HESCHONG, L.; LEE, E., 2009). O método americano LM-83 (IES, 2012) já aplica este conceito, definindo como critérios aceitáveis de iluminação



natural que o ambiente interno apresente o valor de 300 lux em pelo menos 55% da área para 50% das horas com disponibilidade de luz natural. A abordagem do contexto urbano está presente em diversas normas internacionais importantes, o que reflete a necessidade de entender melhor o impacto da geometria urbana no desempenho das edificações e incorporar definições que tenham impacto significativo.

Além da consideração de condições atmosféricas realistas através da adoção de arquivos climáticos, o ambiente urbano cada vez mais tem sido considerado em análises de iluminação, tanto em pesquisas científicas (REINHART, 2016; STRØMANN-ANDERSEN E SATTRUP 2011; CHENG *et al.*, 2006), quanto em normas da área. Alguns instrumentos regulatórios internacionais, como *California's 2019 Building Energy Efficiency Standards* (Title 24, 2019) e LM-83 (IES, 2012), já estão demonstrando em seus textos normativos uma preocupação em como considerar o meio urbano. O método LM-83, por exemplo, traz no corpo do texto diversas características de como as obstruções externas devem ser consideradas no processo de modelagem.

No cenário brasileiro, diversas normas relacionadas ao projeto arquitetônico são definidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e, mais recentemente, envolvendo condições ambientais, a Norma de Desempenho de Edificações ABNT NBR 15.575/2013 (ABNT, 2013). Essa norma estabelece condições mínimas de desempenho relacionados à segurança, habitabilidade e sustentabilidade das edificações. No Código de Obras e Edificações do Distrito Federal - COE (2017), menciona-se no Art. 121 que edificações unifamiliares, bifamiliares ou multifamiliares devem atender aos requisitos e critérios de desempenho estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras. A norma de desempenho de edificações ABNT NBR 15.575/2013 (ABNT, 2013) representa um grande avanço para a construção civil brasileira por estar englobando a avaliação de desempenho mínimo de alguns aspectos da edificação que antes eram avaliados somente quando se buscava um desempenho superior por meio de certificações ambientais. Entretanto, ainda existem aspectos que devem ser aprimorados, principalmente em questões relacionadas ao tópico de habitabilidade, no qual são estabelecidos, dentre outros, os critérios mínimos de desempenho lumínico.

Com relação ao desempenho lumínico, verifica-se no corpo do texto a desconsideração sobre os principais avanços realizados na área nos últimos 10 anos (PEREIRA, FONSECA, SCALCO, 2017). Além disso, apesar do entorno ser citado no corpo do texto, ainda permanece

o questionamento de como o contexto urbano deve ser considerado e analisado. A falta de critérios para modelagem e definição do contexto urbano pode gerar insegurança jurídica em normas e legislações obrigatórias visto que obstruções externas podem impactar de forma negativa o desempenho lumínico de ambientes internos.

As diferentes características do entorno, como espaços abertos entre edifícios, afastamento entre edifícios e até mesmo as cores das fachadas tem impacto no comportamento luminoso de ambientes internos. Uma determinada área urbana pode apresentar edificações com características geométricas diferentes, mesmo considerando os mesmos índices urbanísticos. Assumir que uma edificação deve ser projetada para garantir seu desempenho mínimo e melhor aproveitamento dos recursos naturais deve acontecer na fase de concepção de projeto. Analisar o comportamento luminoso considerando o cenário urbano existente ainda nesta etapa permite que a tomada de decisão acerca do dimensionamento dos ambientes internos seja mais adequada.

A análise luminosa nas fases finais de projeto pode trazer resultados que impactam negativamente o atendimento às normas, principalmente em função da dificuldade de alteração das características gerais do projeto. Além disso, nesta mesma fase também passa a ser mais complexa a alterações de outras variáveis do projeto como esquadrias e profundidade dos ambientes. Hoje, é necessário ter conhecimentos em ferramentas avançadas de análise de iluminação para verificar, de forma quantitativa, o quanto o contexto urbano pode influenciar na iluminação natural do ambiente interno. Este é um dos aspectos mais relevantes que faz com que projetistas tenham dificuldade de avaliar de forma mais precisa a relação contexto urbano e desempenho lumínico nas fases iniciais de projeto.

Diante do exposto, esse trabalho visa analisar a influência da geometria urbana e da visibilidade de céu no desempenho luminoso anual do ambiente interno considerando dados climáticos padronizados. Para isto, buscou-se inicialmente analisar conceito de visibilidade de céu por meio de parâmetros desenvolvidos em estudos anteriores (a) e verificar como os dados climáticos de diferentes localidades e orientações solares podem influenciar na radiação incidente no plano vertical (b). Além disso, o estudo também propõe uma análise de cenários urbanos, a fim de se identificar a contribuição de vazios urbanos e da reflexão das superfícies externas no desempenho lumínico dos ambientes internos (c). Também buscou-se identificar um parâmetro que pudesse representar o potencial de obstrução de um cenário urbano com características irregulares e que fosse de fácil identificação em fases iniciais de projeto (d). Este estudo visa auxiliar a discussão do entorno em relação à ABNT/NBR 15.575, visto que a norma

vigente não apresenta nenhum detalhamento de consideração do entorno, bem como, alguma forma simplificada de análise.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência da geometria urbana e da visibilidade de céu no desempenho lumínico anual de ambientes internos com base em dados climáticos padronizados.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar o conceito de visibilidade de céu para simulações *Climate Based Daylight Modelling* (CBDM) com base em proposições de pesquisas realizadas anteriormente;
- b) Identificar o potencial de incidência de radiação solar no plano vertical de diferentes parcelas de céu com base na orientação solar e base climática local e avaliar sua relação com a disponibilidade de luz natural no ambiente interno;
- c) Verificar o comportamento da componente refletida da luz no meio urbano e a contribuição de vazios urbanos no desempenho luminoso anual do ambiente interno;
- d) Identificar um parâmetro representativo que caracterize uma simplificação de um cenário urbano com obstruções irregulares.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos. No primeiro é apresentada a introdução, contextualizando a problemática e justificativa do tema a ser abordado de forma sintética. Na sequência são apresentados objetivo geral e específicos do trabalho além da estruturação do trabalho.

No segundo capítulo é apresentado o referencial bibliográfico em que são tratadas três questões. No tópico 2.1 são levantadas normas e legislações existentes e como elas abordam a relação entre iluminação natural e contexto urbano. No tópico 2.2 são exemplificados os parâmetros utilizados na análise de iluminação natural tanto no meio urbano como no ambiente interno. O tópico 2.3 apresenta as principais e mais recentes pesquisas que abordam o uso de

simulação computacional para análise de desempenho lumínico em contextos urbanos. Por fim, o último tópico do capítulo (2.4) traz as considerações finais sobre a revisão apresentada.

No terceiro capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos que foram utilizados na pesquisa para alcançar os objetivos propostos. A metodologia da pesquisa está dividida em cinco etapas. Na primeira etapa (tópico 3.1) foi verificada a aplicabilidade do conceito de visibilidade de céu considerando simulação de iluminação natural *Climate Based Daylight Modelling*. Na segunda etapa (tópico 3.2) foi realizada uma análise de radiação solar com base em arquivo climático. Na terceira etapa (tópico 3.3), foram realizadas simulações de iluminação natural para diversos contextos urbanos. Na quarta etapa (tópico 3.4) foi estruturada uma forma de análise simplificada de contextos urbanos irregulares, definida por meio de um ângulo de obstrução vertical representativo. Na última etapa (tópico 3.5) foi realizada uma análise de comparação entre a os resultados de simulação de cenários irregulares, o comportamento do mesmo considerando uma obstrução contínua e os resultados obtidos para os ângulos representativos calculados.

Os dois últimos capítulos apresentam, respectivamente, os resultados e discussões da pesquisa (capítulo 4) e as conclusões (capítulo 5). Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho e anexos.

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

A revisão de literatura está dividida em três tópicos principais. O primeiro (tópico 2.1) traz um panorama geral de como a iluminação natural e o contexto urbano são abordados em textos normativos. No segundo tópico (2.2) apresentam-se os parâmetros comumente utilizados na análise de iluminação natural no meio urbano e no ambiente interno. O terceiro tópico (2.3) apresenta pesquisas mais recentes na área que abordam a influência do contexto urbano no desempenho lumínico da edificação, considerando diferentes abordagens e medidas. O último tópico (2.4) apresenta as considerações finais referentes à revisão bibliográfica apresentada.

### 2.1 ABORDAGEM DA ILUMINAÇÃO NATURAL E DO CONTEXTO URBANO EM TEXTOS NORMATIVOS

Em todo o mundo, as cidades adotam legislações de zoneamento para licenças de construção. Essas legislações utilizam critérios simplificados de iluminação e geometria para garantir condições mínimas de acesso solar a todos os edifícios e ruas (SARATSI; DOGAN; REINHART, 2016). Neste capítulo será apresentado um panorama de como a iluminação natural e o contexto urbano são abordados em normas técnicas, certificações ambientais e regulamentos urbanísticos e levantadas as diferenças e relações entre eles.

Normas, regulamentos e certificações focadas no desempenho de edificações normalmente abordam a questão da luz natural dentro do quesito de qualidade do ambiente interno, trazendo diversos parâmetros de como deve ser analisada. A medida mais utilizada para se avaliar iluminação é a iluminância de uma superfície horizontal interna a uma altura equivalente ao plano de trabalho (TREGENZA; MARDALJEVIC, 2018). Entretanto, com relação ao entorno urbano percebe-se que há pouco detalhamento da forma como ele deve ser considerado em análise nos textos normativos. Este é um dos pontos levantados neste tópico visto que as obstruções externas podem ter impacto negativo no desempenho lumínico dos ambientes internos.

No cenário brasileiro, a norma de desempenho ABNT/NBR 15575-1 utiliza no método de simulação a medida de iluminância para realizar a avaliação de desempenho lumínico, considerando como desempenho mínimo o valor de 60 lux no ponto central do ambiente. No

tópico 2.2.2.1 serão abordados mais detalhes com relação às medidas de avaliação. A certificação brasileira GBC Casa&Condomínio (GBC, 2017) faz referência à ABNT/NBR 15575-1 para o atendimento do pré-requisito e Desempenho Mínimo do Ambiente Interno e do crédito Desempenho Lumínico. Com relação ao contexto urbano a norma menciona que devem ser considerados eventuais sombreamentos resultantes de edificações vizinhas, taludes, muros e outros possíveis anteparos desde que se conheça o local (ABNT, 2013). Nesta abordagem pode-se perceber que o contexto urbano é mencionado sem detalhamento de como deve ser considerado. Ficam vagas diversas questões que têm influência significativa no desempenho lumínico, como, por exemplo a abrangência e detalhamento do entorno, com relação à vegetação, às refletâncias das superfícies externas das edificações.

Apesar da existência de diversas normas relacionadas ao desempenho de edificações, em geral, os textos normativos que tratam do planejamento das cidades não abordam os mesmos parâmetros e medidas de análise. O plano diretor é o instrumento regulatório que controla o crescimento e a configuração volumétrica das cidades. Nele estão estabelecidos índices que definem os parâmetros geométricos, afastamentos laterais, recuos de jardim e a taxa máxima de ocupação do solo. A diversidade do parcelamento associado ao regime urbano resulta em uma ampla gama de alturas e recuos, o que configura um espaço descontínuo no interior da quadra (ZANDAVALI, 2019). As cidades têm seus planos diretores revistos regularmente, o que também gera características diversas. Um exemplo é a cidade de Porto Alegre, que passou por três planos urbanos (1959, 1979 e 1999) os quais apresentaram sequenciais adaptações. Cada novo plano resultou em regras de planejamento urbano descontextualizadas que não consideraram o tecido existente e a transição de um plano para o outro, apresentando influências de ideologias opostas (ZANDAVALI, 2019). Os planos diretores no Brasil não apresentam nenhum critério simplificado para análise da iluminação natural considerando tecido urbano existente nem buscam caracterizar a forma urbana do ponto de vista do desempenho de edificações.

Alguns códigos de obra revisados recentemente já vêm fazendo algumas alterações em seus textos referenciando as normas técnicas brasileiras. Na última revisão do Plano Diretor de São Paulo, em 2014, juntamente com a entrada em vigor da Norma de Desempenho ABNT/NBR 15.575/2013, houve a retirada das faixas de insolação que existiam na regulamentação anterior (SÃO PAULO, 2014). Mais recentemente, em Curitiba (2019) foi atualizada a Lei de zoneamento, Uso e Ocupação do Solo, em que no Art. 208 Parágrafo Único define que o afastamento deverá levar em consideração a orientação geográfica do imóvel e

garantir condições de iluminação, insolação e ventilação para a edificação a ser construída no imóvel, assim como às existentes nos imóveis adjacentes (CURITIBA, 2019).

Pode-se perceber que, em geral, as regulamentações não fazem menção ao entorno existente. Entretanto, com o adensamento das cidades é coerente que alguns textos normativos comecem a abordar este tema, como é o caso da Lei de Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo (CURITIBA, 2019). Avaliar a situação existente do contexto urbano permite que sejam evitados problemas graves de sombreamento entre as edificações e garantir um crescimento mais sustentável das cidades.

No âmbito internacional, em 2012 foi desenvolvido o método LM-83 (IES, 2012) o qual foi incorporado pelas certificações LEED v4, WELL v1 e WELL v2 *Pilot*. O método americano LM-83 (IES, 2012) aplica o conceito da Modelagem de Iluminação com Base no Clima (*Climate Based Daylight Modelling – CBDM*), definindo como critérios aceitáveis de iluminação natural para o ambiente interno. Esta forma de modelagem caracteriza condições mais realistas para a avaliação da iluminação natural, visto que utilizada dados climáticos padronizados e avalia o potencial de iluminação no tempo e no espaço. No tópico 2.2.2 serão apresentadas as características dessa análise com mais detalhes. Ainda, na seção 2.2.8 do método LM-83, são definidos os níveis mínimos de detalhamento para a modelagem do entorno, para a simulação computacional (IES, 2012). Nesta seção define-se que devem ser modeladas edificações ou estruturas opacas distantes até pelo menos 30 metros do objeto de estudo e devem ser consideradas refletâncias de 30% e 10% para fachadas e piso exterior, respectivamente, caso não se conheça o valor real. Caso não se conheça o entorno existente, deve-se considerar obstruções vizinhas de altura igual ao objeto de estudo. Árvores também devem compor o contexto externo a ser modelado. Elas devem ser modeladas genericamente como cones, esferas ou cilindros e considerar uma refletância de 20% (IES, 2012).

Um estudo realizado na Califórnia pela IES (*Illuminating Engineering Society*, 2012), realizou um estudo em edifícios de escritórios existentes em que 60% estavam sujeitos a sombreamento de árvores próximas, 11% estavam adjacentes à edifícios altos em áreas centrais e outros 5% em áreas suburbanas. O levantamento mostrou que a iluminação natural de 61 espaços foi afetada quando as janelas desses espaços tinham obstruções próximas com um ângulo de obstrução vertical médio de 25°, independentemente do nível do piso do espaço de estudo.

Na área de eficiência energética, uma publicação recente *What's New in 2019 Title 24, Part 6 for Residential Lighting* (CLTC, 2019) relata que o regulamento norte americano *California's 2019 Building Energy Efficiency Standards* adicionou uma exceção com relação às obstruções externas e controles de luz natural automatizados. O regulamento menciona que não são mais obrigatórios sensores de luz natural para áreas com claraboias em que estruturas ou objetos externos bloqueiem a luz solar direta por mais de 1.500 horas por ano (CLTC, 2019).

Saratsis, Dogan e Reinhart (2017), os autores apontam que o Regulamento de Zoneamento da cidade de Nova Iorque (*New York's Zoning Handbook*) sofreu alterações nos últimos anos devido a intensos problemas de sombreamento de novos empreendimentos. O aparecimento de muitos arranha céus desencadeou a criação de um documento que estabeleceu controles de altura. No texto do *New York's Zoning Handbook* os empreendimentos devem apresentar conformidade por meio de limites de alturas e recuos, entre outras restrições. Aqueles que não apresentam essa conformidade devem apresentar um relatório identificando que o sombreamento não está causando prejuízo na iluminação natural e insolação de edificações vizinhas (SARATSI; DOGAN; REINHART, 2017). Entretanto, os autores destacam alguns pontos como limitações:

- O acesso à iluminação natural é apresentado como um conceito atrelado à paisagem urbana, pois a limitação do potencial de iluminação natural afeta também ou interiores de edifícios adjacentes.
- Apesar do zoneamento ser bastante detalhado ele é descontextualizado de contexto urbano existente ao redor do novo empreendimento. Isso faz com que as diretrizes propostas tenham meios limitados para garantir adequadamente o acesso à iluminação em condições mais complexas.
- Os regulamentos não levam em consideração a localização dos empreendimentos e orientação das fachadas ao longo do ano.

Os autores apontam que embora haja um consenso crescente sobre como quantificar a disponibilidade de luz natural do edifício individual, esses conceitos não estão sendo aplicados atualmente para a análises a nível urbanístico.

No Brasil, os índices urbanísticos são definidos de forma genérica e se limitam a caracterizar o lote isoladamente. O parcelamento do solo muitas vezes se apresenta irregular em função da compra e venda do mesmo por parte do setor privado, podendo apresentar lotes de tamanhos diversos em um mesmo contexto urbano. As restrições geométricas sendo correlacionadas às dimensões individuais do lote resultam em um espaço urbano



excessivamente heterogêneo e imprevisível (ZANDAVALI, 2019). Assim, dificulta-se também encontrar um parâmetro de análise de iluminação natural no meio urbano que represente o impacto dessa geometria na iluminação natural do ambiente interno e que considere o tecido urbano existente. O meio urbano está diretamente relacionado ao desempenho dos ambientes internos. As cidades vêm crescendo a cada dia assim como as novas tecnologias, o que nos possibilita ter um entendimento maior de como a iluminação se comporta no meio urbano até incidir no ambiente interno. É fundamental que normas e certificações tenham a preocupação não só em definir parâmetros de controle nas legislações, mas também como caracterizar o que já existe no espaço urbano.

## 2.2 PARÂMETROS DE ANÁLISE DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Neste capítulo são apresentadas algumas das medidas e ferramentas utilizadas na análise de iluminação natural no meio urbano e no ambiente interno. Na seção 2.2.1 serão apresentados os parâmetros utilizados para realizar a análise de iluminação natural no meio urbano por meio de métodos gráficos e computacionais para caracterizar uma determinada obstrução externa. Na seção 2.2.2 são apresentados parâmetros que permitem a análise da iluminação natural no ambiente interno, por meio da explicação dos conceitos e valores utilizados nacional e internacionalmente. São exemplificadas formas de análise do comportamento da iluminação natural no ambiente interno de maneira pontual (para uma data específica) e integradas ao longo de um período de tempo.

### 2.2.1 Parâmetros de análise de Iluminação Natural no Meio Urbano

Neste tópico são apresentados os parâmetros de análise de iluminação natural no meio urbano em dois grupos: parâmetros geométricos para análise de visibilidade de céu (tópico 2.2.1.1) e conceitos propostos para avaliar a disponibilidade de luz natural (tópico 2.2.1.2).

#### 2.2.1.1 Parâmetros Geométricos para Análise de Visibilidade de Céu

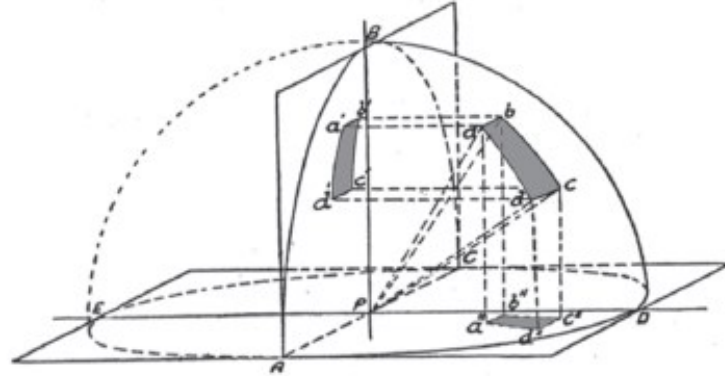
Neste tópico serão apresentados parâmetros utilizados para realizar a análise de visibilidade de céu. São eles: Fator de Céu Visível, Ângulo de Obstrução Vertical, Ângulo de Céu Visível, Linha de Céu Não Visível.

O Fator de Céu Visível (FCV) é definido como a proporção de iluminância recebida diretamente de um céu uniforme em um ponto no espaço, em relação à iluminância externa sob um hemisfério desobstruído do céu (LITTLEFAIR, 1991). O Fator de céu visível é expresso em porcentagem e representa a porção da abóboda celeste que está desobstruída em um determinado ponto ou plano, onde 0% representa um céu totalmente obstruído e 100% um céu totalmente desobstruído. Pode-se definir o Fator de Céu Visível por meio da Equação 1:

$$FCV = \frac{\text{área de céu visível}}{\text{área de céu total}} \quad (1)$$

A Figura 1 apresenta um esquema de como uma parcela de céu pode ser determinada pelo Fator de Céu Visível. O Fator de Céu Visível pode ser calculado por meio de ferramentas gráficas, analíticas ou fotográficas.

Figura 1 - Porção de céu identificada no plano vertical (a'b'c'd') e no plano horizontal (a''b''c''d'')



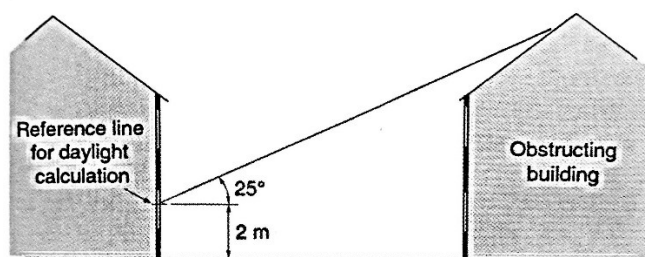
Fonte: Hamzah; Lau - adaptado de Waldram 1950 (2016)

Os indicadores mais comuns utilizados para verificar o quanto uma janela é impactada pelas obstruções externas de forma gráfica são o ângulo de obstrução vertical e o ângulo de visão de céu.

O ângulo de obstrução vertical é definido como o ângulo de altitude no topo de uma obstrução externa em relação ao plano horizontal, medida a partir de um ponto de referência em um plano vertical em uma seção perpendicular ao plano vertical (LITTLEFAIR, 1991). O

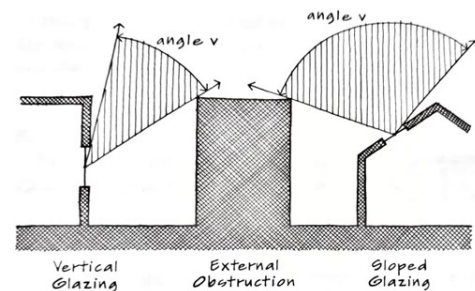
ângulo de obstrução vertical (Figura 2) considera a obstrução externa como um plano contínuo e infinito e, portanto, desconsidera a existência de vazios entre edificações, que pode representar significativas quantidades de luz natural em um determinado ponto (LEDER, 2007). O ângulo de visão de céu (Figura 3) é o oposto do ângulo de obstrução vertical e é definido como o ângulo medido a partir de um plano perpendicular à janela em que o céu é visível a partir do centro da mesma (BROWN; DEKAY, 2001).

Figura 2 - Ângulo de Obstrução Vertical



Fonte: Littlefair (1991)

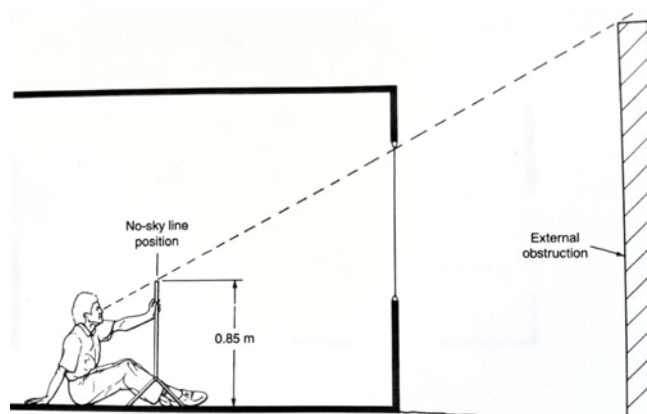
Figura 3 - Ângulo de Visão de Céu



Fonte: Brown e Dekay (2001)

A linha de céu não visível é definida por Littlefair (1991) como uma linha projetada no plano de trabalho em que a partir do último ponto dessa linha nenhuma parcela de céu é visível. A linha de céu não visível divide o plano de trabalho em duas áreas: aquelas que recebem e as que não recebem luz direta do céu (LITTLEFAIR, 1991). Este parâmetro é medido a partir do ambiente interno e está diretamente vinculado à condição de obstrução do ambiente externo. A Figura 4 apresenta um esquema do conceito da Linha de Céu não Visível.

Figura 4 - Linha de não visão do céu



Fonte: Littlefair (1991)

A linha de céu não visível relaciona as seguintes variáveis: altura do plano de trabalho até a verga da janela, distância horizontal entre a janela e a obstrução externa e diferença de altura entre a altura da verga e altura da obstrução externa. Essa relação é descrita pela Equação 2. A Figura 5a e 5b apresentam como as variáveis da fórmula estão relacionadas

$$d = x \times \frac{h}{y} \quad (2)$$

Onde: d = profundidade do ambiente com visão do céu (m)

h = altura da verga da janela acima do plano de trabalho (m)

y = altura da obstrução acima da verga da janela (m)

x = distância horizontal da abertura até a obstrução

Figura 5a - Relação das variáveis da linha de céu não visível em planta baixa

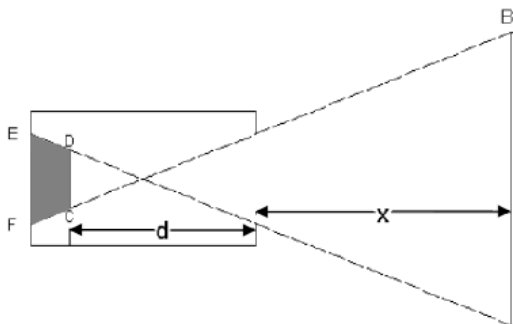
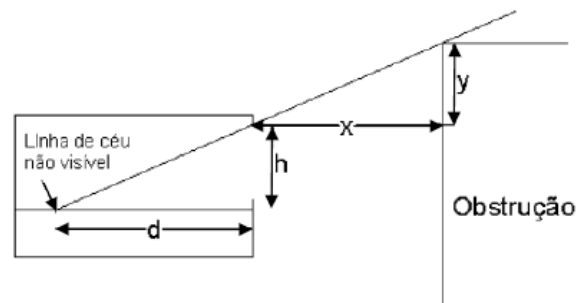


Figura 5b - Relação das variáveis da linha de céu não visível em corte



Fonte: Littlefair (1991)

Segundo Littlefair (1991), a linha de céu não visível é um bom indicador para avaliar o quanto a iluminação está bem distribuída em um ambiente interno.

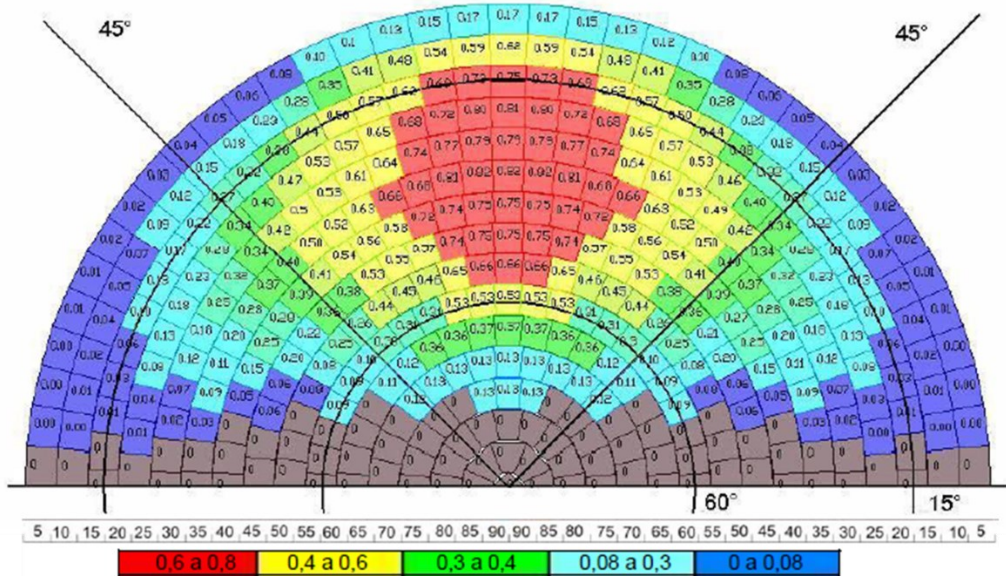
#### 2.2.1.2 Conceitos Propostos para Avaliar a Disponibilidade de Luz Natural

Neste tópico serão apresentados conceitos para avaliar a disponibilidade de luz natural por meio da visibilidade de céu. São eles: a Janela de Céu Preferível (JCP) e a área de Visão de Céu Desobstruída (AVD).

A Janela de Céu Preferível foi desenvolvida por Leder (2007), com o propósito de encontrar um parâmetro utilizável no aprimoramento da legislação urbanística com relação à disponibilidade de luz natural no ambiente externo e interno. A autora identifica uma parcela da abóboda celeste que possui maior potencial de iluminação em relação a um plano localizado no ambiente interno. O parâmetro foi caracterizado por meio de três aspectos: contribuição de luz relativa de diferentes parcelas da abóboda celeste, efeito redutor do cosseno do ângulo de incidência e o percentual de visão da abóboda no ambiente interno.

O estudo que definiu a Janela de Céu Preferível foi resultado de três etapas de análise. Primeiramente, analisou-se a contribuição relativa da abóboda sobre os planos vertical e horizontal. Em seguida foram realizadas análises sobre o percentual de visão do céu. Por fim, foram realizadas análises do potencial de iluminação do céu (LEDER, 2007). A autora realiza um estudo do potencial de iluminação no ambiente interno fazendo o cruzamento do gráfico de contribuição relativa da abóboda celeste em um plano horizontal com o percentual de visão de céu no ambiente interno. O resultado é uma área intermediária entre o zênite e o horizonte. Neste cruzamento de dados notou-se que a variável de maior influência é o percentual de visão de céu. A Figura 5 apresenta o comportamento médio desse estudo resultante da sobreposição dos gráficos para diversos modelos de ambientes internos analisados, sendo que na região assinalada se encontra a parcela de céu que possui maior potencial de iluminação do ambiente interno.

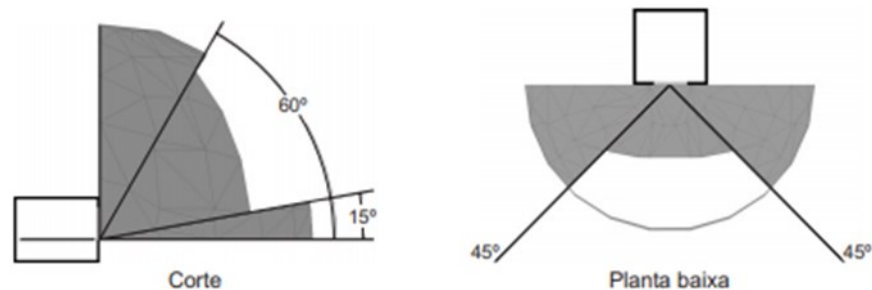
Figura 5 - Potencial de iluminação do céu sobre o plano no ambiente interno com a definição da área de céu preferível sobre o mesmo



Fonte: Adaptado de Leder (2007)

A definição da Janela resultou em uma região da abóboda celeste que apresenta limites horizontais de  $45^\circ$  à esquerda e à direita e limites verticais de  $15^\circ$  inferior e  $60^\circ$  superior, conforme é apresentado na Figura 6. De acordo com Leder (2007), a área definida para céu preferível apresenta 34% de Fator de Céu Visível, enquanto a área remanescente apresenta um Fator de Céu Visível de aproximadamente 66%.

Figura 6 - Ângulos verticais e horizontais definidos pela Janela de Céu Preferível



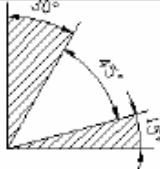
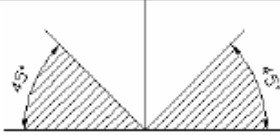

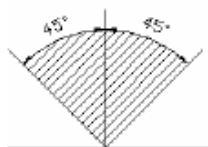


Fonte: Leder e Pereira (2005)

Leder (2007) realizou simulações para Fator de Luz Diurna e Iluminância para diversos ambientes internos em contextos urbanos reais a fim de realizar análises de correlação entre os valores obtidos para essas medidas e o Fator de Céu Visível obtidos para três cenários

analisados: Céu totalmente desobstruído, Janela de Céu Preferível Desobstruída e Céu Remanescente Desobstruído (Figura 7).

Figura 7 - Obstruções propostas no estudo JCP

Identificador	Croqui em corte	Croqui em planta baixa	Percentual céu preferível
Céu totalmente desobstruído			100%
Janela de Céu Preferível desobstruída			100%
Céu remanescente desobstruído			0%

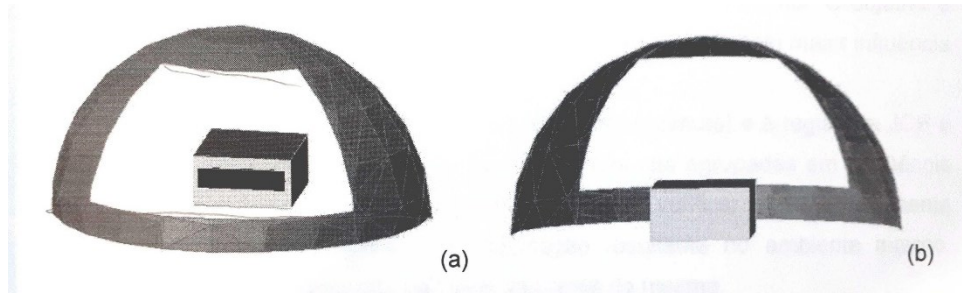
\* A área hachurada corresponde à porção do céu obstruída

Fonte: Leder (2007)

Foram realizadas análises de correlação linear de Pearson em que o Fator de Céu Visível x Fator de Luz Diurna apresentou um valor de 0,82, enquanto quando realizada a correlação entre Fator de Céu Preferível x Fator de Céu Visível esse valor é de 0,95. Da mesma forma para a medida Iluminância quando comparada com o Fator de Céu Visível apresentou uma correlação de 0,81 enquanto para Fator de Céu Preferível o valor foi de 0,87. Quando é realizada a análise de correlação linear de Pearson para a área remanescente da JCP os valores são substancialmente menores. A análise de correlação realizada com Fator de Luz Diurna resultou em um valor igual a 0,43 e para a Iluminância obteve-se um valor igual a 0,51.

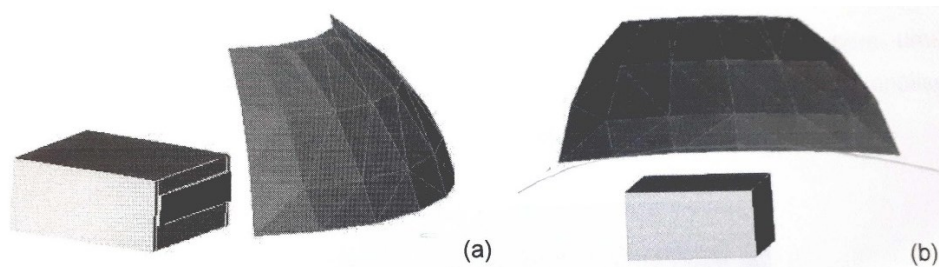
Com isso, o estudo realizado concluiu, com as ferramentas e possibilidades da época, que existe uma parcela de céu que contribui significativamente para a iluminação natural (Figura 8) do ambiente interno em detrimento da parcela remanescente (Figura 9). O estudo foi realizado para as medidas de análise Fator de Luz Diurna e Iluminância, as quais consideram um céu uniformemente encoberto e um dia e um horário isolado no ano, respectivamente.

Figura 8 - Modelo de Céu Preferível proposto pela JCP



Fonte: Leder (2007)

Figura 9 - Modelo de Céu Remanescente proposto pela JCP

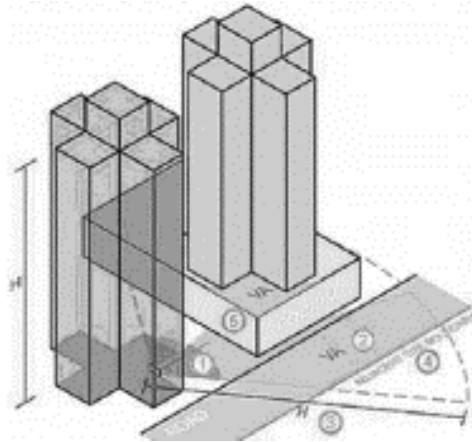


Fonte: Leder (2007)

A Área de Visão Desobstruída foi um método desenvolvido por Ng (2003) que consiste em uma análise angular das obstruções externas. Representa um cone de visão que delimita a área desobstruída vista de uma janela em um ambiente rodeado por obstruções externas (Figura 10). O método foi desenvolvido inicialmente com base no entendimento de que a iluminação natural incidente na janela depende da parcela visível da abóboda celeste (NG, 2003). Esta forma de análise foi proposta com o intuito de ser incorporada nos regulamentos de construção voltados para desempenho na cidade de Hong Kong.



Figura 10 - Área de Visão Desobstruída



Fonte: Ng (2003)

O cone de visão é medido a partir do centro da janela e delimitado a 100° de ângulo horizontal ou azimute (50° à esquerda e à direita) e pela altura da obstrução em corte (ângulo vertical).

O valor do parâmetro Área de Visão Desobstruída (AVD) pode ser obtido por meio da Equação 4. A dimensão adequada desta área dependerá do desempenho da luz natural com base no Fator de Luz Diurna (FLDV). Assim, a constante “k” está diretamente associada ao FLDV, ou seja, para cada valor de FLDV existe um valor de “k” correspondente.

$$AVD = k \times H^2 \quad (4)$$

Onde:

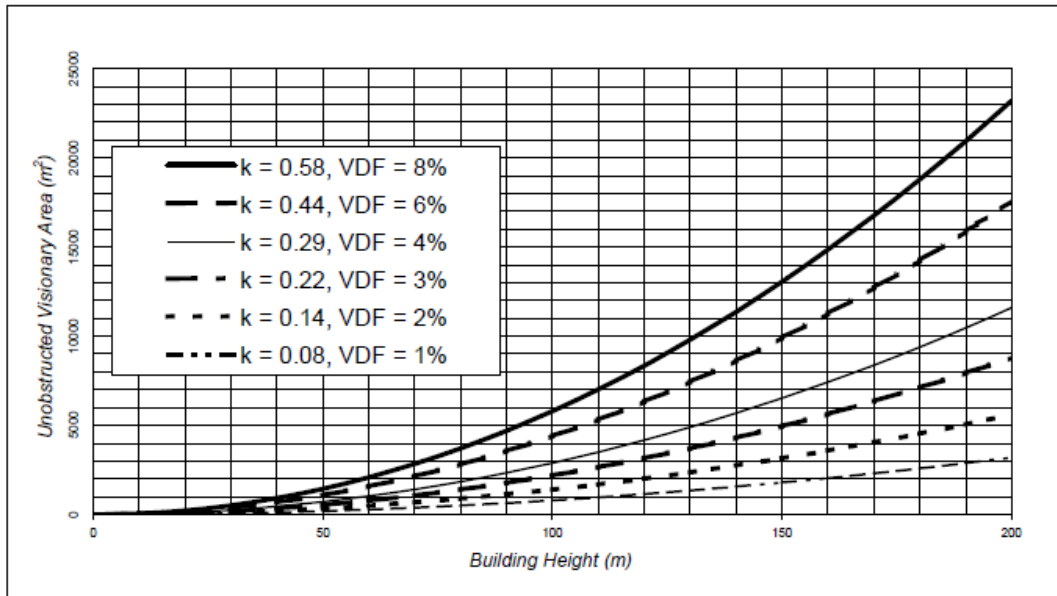
AVD – Área de Visão desobstruída

k – Constante relacionada ao desempenho de luz natural

H – Altura da obstrução externa

A Figura 11 apresenta a relação entre a altura dos edifícios e a AVD para cada valor de FLDV. Conforme aumenta-se a altura dos edifícios aumenta-se a necessidade de AVD para se atingir o FLDV correspondente.

Figura 11 - Relação entre a altura dos edifícios e a AVD para cada valor de FLDV



Fonte: Ng (2003)

## 2.2.2 Parâmetros de Análise de Iluminação Natural no Ambiente Interno

Nesta sessão do capítulo são apresentadas as medidas utilizadas para a análise da iluminação natural no ambiente interno. As análises de iluminação natural, podem ser realizadas por simulações computacionais ou por medições. Com os avanços tecnológicos hoje é possível, além de analisar a iluminação natural de forma pontual, analisá-la também integrada ao longo de um período de tempo. No item 2.2.2.1 serão apresentadas as medidas relacionadas às análises pontuais e as que consideram um céu uniforme: Iluminância Pontual (*Point-in-time Illuminance*) e Fator de Luz Diurna (*Daylight Factor*), respectivamente. Com relação às análises integradas no tempo, serão apresentadas no item 2.2.2.2 as simulações de Iluminação Natural Modeladas com Base no Clima (*Climate Based Daylight Modelling - CBDM*). Esta forma de modelagem engloba as medidas de Autonomia da Luz Natural (*Daylight Autonomy*), Autonomia da Luz Natural Espacial (*Spacial Daylight Autonomy*), Iluminâncias Úteis (*Useful Daylight Illuminance*) e Exposição Anual à Luz Solar (*Annual Sunlight Exposure*).

### 2.2.2.1 Fator de Luz Diurna (*Daylight Factor - DF*) e Iluminância Pontual (*Point-in-time Illuminance*)

As análises descritas neste tópico têm como principal característica não considerarem a variação temporal da luz no ambiente interno. Elas podem ser realizadas por meio de uma simulação de iluminância pontual (*Point-in-time Illuminance*) ou por meio do Fator de luz Diurna (*Daylight Factor - DF*) que considera um céu uniformemente encoberto.

As simulações de iluminância pontuais permitem uma análise para um determinado dia e horário no ano considerando um céu estático. Este tipo de análise pode ser realizado por meio de simulação computacional ou por meio de medição. A medida utilizada nesta forma de análise é a iluminância que é verificada em cada ponto de uma malha de cálculo na altura do plano de trabalho. Atualmente, a certificação ambiental LEED v4 ainda mantém em seus textos normativos essa forma de análise tanto por meio de simulação computacional como por medição. Para a opção de simulação, a avaliação é realizada nos dias de equinócio do ano (21/09 e 21/03) às 9h e as 15h, totalizando quatro análises e pelo menos 55% da área de análise deve atingir valores de iluminância entre 300 lux e 3000lux. Para a opção de medição são utilizados os mesmos critérios de iluminância, área e horário, entretanto as medições devem ser realizadas a cada quatro meses durante o período de um ano, totalizando pelo menos quatro medições, não necessariamente nos dias de equinócio. No cenário brasileiro, a ABNT NBR 15573/2013 também utiliza a análise por meio de simulação de iluminância pontual que deve ser de 60 lux no centro do ambiente. Deve-se verificar o valor da iluminância para os dias 23/04 e 23/10 às 9:30 e 15:30 e considerar um céu encoberto. Este meio de análise vem sendo revisto recentemente.

Já, o Fator de Luz Diurna foi concebido como um meio de classificar o desempenho da luz natural independentemente das condições de variação do céu. Definiu-se o Fator de Luz Diurna como a razão entre a iluminância horizontal interna ( $E_{int}$ ) e a iluminância horizontal externa desobstruída ( $E_{ext}$ ), expressa em porcentagem (MARDALJEVIC; CHRISTOFFERSEN; RAYNHAM, 2013). O Fator de Luz Diurna pode ser obtido por meio da Equação 5:

$$DF = \frac{E_{int}}{E_{ext}} \times 100\% \quad (5)$$

Onde:

DF = Fator de Luz Diurna

$E_{int}$  = Iluminância Horizontal Interna

$E_{ext}$  = Iluminância Horizontal Externa

Valores médios para Fator de Luz Diurna para ambientes internos são recomendados por guias e normatizações britânicas e europeias. Hoje, normas como a prEN 17037:2018 – *Daylight in buildings* (CEN, 2018) já realizaram atualizações para considerar o FLD com base nas variações climáticas. No cenário brasileiro, a análise por meio do Fator de Luz Diurna (FLD) está presente também na ABNT NBR 15575/2013, porém somente quando a análise é realizada por meio de medição. Nesta forma de avaliação deve ser realizada em dias com cobertura de nuvens maior que 50%, sem ocorrência de precipitações e deve-se atingir o valor mínimo FLD de 0,5% em um período compreendido entre 9h e 15h.

#### 2.2.2.2 Modelagem de Iluminação Natural Baseada no Clima (*Climate Based Daylight Modelling* - CBDM)

Simulações computacionais que envolvem a Modelagem da Iluminação Natural Baseada no Clima (*Climate Based Daylight Modelling* - CBDM) levam em consideração a variabilidade do sol e do céu em uma condição temporal. Este modelo de análise permite avaliar a previsão de quantidades luminosas como iluminância interna em uma base anual horária (ou mais curta), fundadas em dados meteorológicos padronizados para a localidade do edifício sob avaliação. Assim, a luz é avaliada de modo mais realista, considerando o efeito de iluminação do sol e do céu juntos (MARDALJEVIC; CHRISTOFFERSEN; RAYNHAM, 2013).

Diferentemente da medida Fator de Luz Diurna, simulações CBDM utilizam o modelo de céu definido por Perez *et al.* (1990). Para a definição de céu, os autores utilizaram modelos que foram amplamente validados usando dados representativos de vários ambientes climáticos variando de desertos, climas marítimos, continentais e subtropicais. A abordagem experimental utilizada permitiu delinear situações intermediárias como um céu muito claro ou totalmente nublado (PEREZ *et al.*, 1990). Os dados climáticos de radiação global e direta hoje já são amplamente disponibilizados. Estes dados possibilitaram aos autores desenvolver modelos de eficácia luminosa que se relacionam, em termos de número de lúmens por watt para as três componentes básicas da radiação - direta, global e difusa. Além disso, também foram propostos modelos que preveem radiação difusa proveniente de superfícies e modelos relacionados à

distribuição angular da luz proveniente da abóboda celeste. Com o estudo de validação foi possível identificar um comportamento distinto entre cinco localidades estudadas.

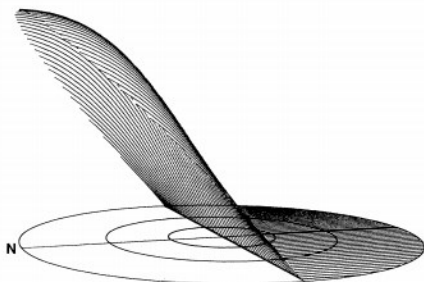
Os dados meteorológicos têm impacto significativo na análise de iluminação natural quando esta é integrada no tempo. Entretanto para se obter uma simulação computacional eficiente de um grande número de diferentes condições de luz do dia só foi possível por meio do uso do método *Daylight Coefficient* (DC) (TREGENZA, 1983). Este coeficiente é calculado por meio da Equação 7, onde DC é a matriz que armazena os valores que descrevem a relação entre os pontos da malha de cálculo (n) e os 145 trechos do céu (mais um para o piso externo), S é a matriz do céu a qual armazena os valores de luminância de cada um dos trechos do céu em cada hora do ano (8760 horas) e a matriz de iluminância resultante (E) é obtida pela multiplicação das duas matrizes anteriores (TREGUENZA, 1983):

$$E = DC \times S \quad (7)$$

$8760 \times n \quad 146 \times n \quad 146 \times 8760$

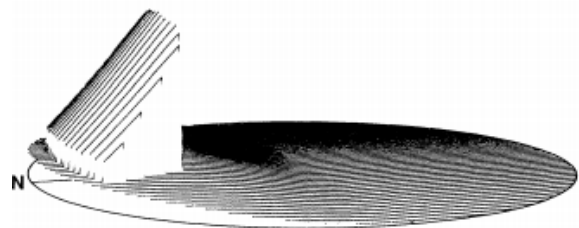
As Figuras 12 e 13 apresentam uma representação gráfica dos coeficientes (*Daylight Coefficients* - DC). A Figura 12 representa os coeficientes (DC) calculados para uma superfície vertical desobstruída e na Figura 13 os coeficientes (DC) para uma superfície horizontal em um ambiente interno, ambas voltados para orientação Norte.

Figura 12 - Coeficiente DC para uma superfície vertical



Fonte: Tregenza (1983)

Figura 13 - Coeficiente DC para uma superfície horizontal em um ambiente interno



Fonte: Tregenza (1983)

Técnicas de simulação computacional por meio de raio traçado, como por exemplo o software *Radiance*, utilizam esta forma de cálculo de iluminação natural integrado no tempo.

Mais recentemente, softwares que incorporam o mapeamento de fótons ou algoritmos de radiação também introduziram ferramentas para implementar o uso de DCs para executar simulações CBDM (BREMBILLA; MARDALJEVIC, 2019).

As medidas mais usuais que utilizam o modelo CBDM são: Autonomia da Luz Natural (*Daylight Autonomy* - DA), Autonomia da Luz Natural Espacial (*Spacial Daylight Autonomy* - sDA), Iluminância Útil (*Useful Daylight Illuminance* - UDI) e Exposição Anual à Luz Solar (*Annual Sunlight Exposure*- ASE).

A Autonomia de Luz Natural representa a porcentagem de horas ocupadas em que o nível de iluminância em um ponto de uma malha de cálculo é maior ou igual a um determinado alvo de iluminância. Já a Autonomia de Luz Natural Espacial é gerada a partir dos dados de Autonomia de Luz Natural e representa a porcentagem área em um determinado plano de trabalho que atinge o alvo definido pela Autonomia da Luz Natural.

A Iluminância Útil definida como a porcentagem de horas ocupadas em que o nível de iluminação fica dentro de uma faixa de valores máximos e mínimos. O valor é contabilizado para cada ponto da malha de cálculo na altura do plano de trabalho e calculado a média dos pontos. Uma Iluminância Útil de 0-100 lux é definida como UDI insuficiente, de 100-300 lux é considerado UDI suficiente, 300-3000 lux é considerado autonomia UDI e para valores acima de 3000 lux é considerado UDI excessivo.

A Exposição Anual à Luz Solar é uma métrica que se caracteriza por considerar apenas a radiação solar direta na simulação e é expressa pela porcentagem de área em um plano de trabalho onde a malha de pontos aponta valores superiores a um determinado alvo para um determinado número de horas de ocupação.

As medidas CBDM têm sido aceitas por diversos grupos de pesquisa nos últimos 15 anos, bem como têm sido incorporadas em legislações Norte Americanas e Europeias (SARATSI; DOGAN; REINHART, 2017). Simulações que utilizam o modelo CBDM já foram aprovadas pela US Illuminating Engineering Society (IES) em 2012, e incorporadas no protocolo do método LM-83 (IES, 2012). A LM-83 aborda as medidas Autonomia da Luz Natural Espacial (sDA) e Exposição Anual à Luz Solar (ASE). De acordo com o método, considera-se que um ambiente possui condição de iluminação aceitável quando atinge 55% da sua área para o alvo de 300 lux para 50% das horas em que há luz natural disponível (sDA<sub>300,50%</sub>) e possui uma iluminação preferível quando 75% da sua área para o alvo sDA<sub>300,50%</sub>. O valor da área resultante considera o fechamento de persianas quando 2% da área exceder os limites definidos pela medida ASE. Esta medida define que o plano de trabalho não deve receber

radiação solar direta que atinja 1000 lux em mais de 250 horas anuais em mais de 10% da sua área de piso.

Para obter créditos de Iluminação Natural na certificação LEED BD+C (*Building Design and Construction*) e ID+C (*Commercial Interior*) devem ser considerados os mesmos parâmetros definidos pela LM-83. De acordo com o guia referencial do LEED v4.1 *Pilot*, é validado 1 ponto quando 40% da área de todos os ambientes regularmente ocupados atingir o alvo de  $sDA_{300/50\%}$ , 2 pontos para 55% da área e 3 pontos para 75% da área para o mesmo critério (USGBC, 2019).

No Reino Unido, a primeira iniciativa para incluir as métricas CBDM foi criada para o *Priority Schools Building Program* (PSBP), um programa obrigatório promovido pela *Education Funding Agency* (EFA) para construir e restaurar centenas de escolas na Inglaterra e no País de Gales. O primeiro requisito mínimo definidos pelo PSBP é de 50% da área para  $sDA_{300/50\%}$ . A segunda condição é medida por UDI e define que as iluminâncias registradas no plano de trabalho estejam dentro da faixa de 100 a 3000 lux por mais de 80% das horas ocupadas (BREMBILLA; MARDAJEVIC, 2019).

Já a norma europeia prEN 17037:2018 – *Daylight in buildings* (CEN, 2018) visando aperfeiçoar a forma como a iluminação natural deve ser avaliada em ambientes internos também adotou métricas CBDM em sua última revisão em 2018. A norma estabelece como critério mínimo que os ambientes atinjam iluminâncias alvo  $sDA_{300/50\%}$  em pelo menos 50% da sua área e  $sDA_{100/50\%}$  em 95% da área, visando garantir suficiência para o desenvolvimento de tarefas e uniformidade de luz no ambiente interno, respectivamente (CEN, 2018). Atualmente, a norma europeia prEN 17037:2018 – *Daylight in buildings* (CEN, 2018) ainda utiliza a métrica Fator de Luz Diurna para a análise de iluminação natural. Entretanto, em função dos diversos estudos realizados nos últimos anos com base no clima, uma das mudanças que a normativa apresentou em 2018 foi que o valor alvo de Fator de Luz Diurna é estabelecido com base na localidade.

Apesar de estarem sendo aplicadas em diversas normas e legislações as simulações CBDM ainda apresentam uma série de incertezas. O uso desta forma de análise vem crescendo nos últimos anos em relação a sua incorporação em normas e legislações ainda na fase de projeto. Assim, há a necessidade de que exista uma ênfase a alguns aspectos como por exemplo à atribuição correta de propriedades ópticas e ao entendimento da sua sensibilidade nos valores de iluminação. Considerando que muitos critérios de conformidade possuem valores-limite

únicos uma pequena alteração na refletância, por exemplo, pode resultar na diferença entre aprovação e reprovação em uma normativa (BREMBILLA; HOPFE; MARDALJEVIC, 2018).

Um estudo desenvolvido por Brembilla; Hopfe e Mardaljevic (2018), apresentou uma comparação para simulações CBDM com relação aos dados de entrada relacionados à refletância das superfícies internas de salas de aula. Foi definido um plano de análise a 0,8 metros e definida uma transmissão visível do vidro igual a 0,8. A Figura 13 apresenta a tabela com os valores de refletância utilizados pelos autores considerando diferentes regulamentos. As refletâncias foram simuladas para o mínimo e o máximo sugeridos pelos instrumentos regulatórios listados.

Figura 14 - Tabela de valores de refletância recomendados

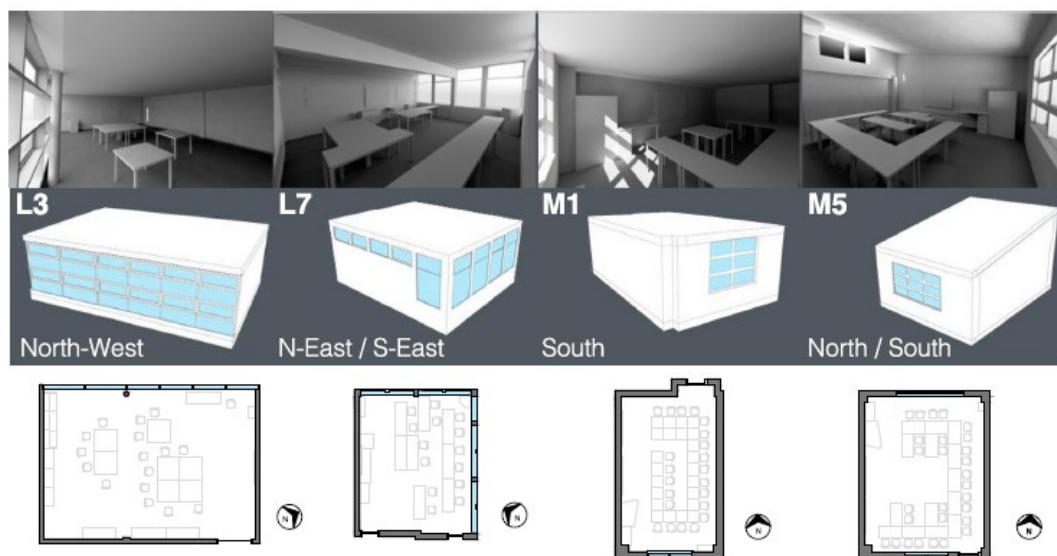
Table 1. Standard values suggested in the literature for the reflectance of the model's main elements.

	Floor	Walls	Ceiling	Sill and frames	External ground	External obstructions
IES LM-83-12	0.2	0.5	0.7	0.5	0.1	0.3
CIBSE AM11	0.05–0.3	0.4–0.7	0.7–0.85	n.a.	0.05–0.3	n.a.
CIBSE LG5	0.2–0.4	0.5–0.8	0.7–0.9	n.a.	n.a.	n.a.
CIBSE LG7	0.2–0.4	0.3–0.7	> 0.6	n.a.	n.a.	n.a.
PSBP	0.2	0.5	0.7	n.a.	n.a.	n.a.

Fonte: Brembilla, Hopfe e Mardaljevic (2018)

A Figura 14 apresenta as tipologias de ambientes de sala de aula utilizados para as simulações.

Figura 15 - Tipologias de salas de aula

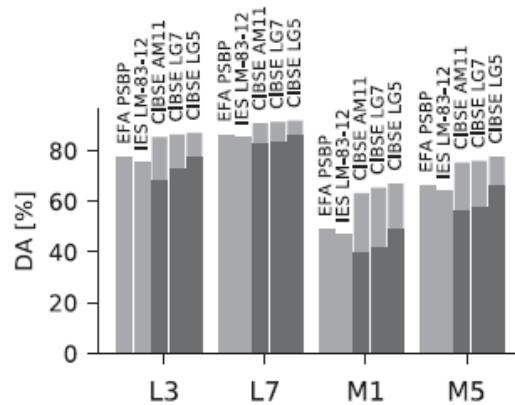


Fonte: Brembilla, Hopfe e Mardaljevic (2018)



Os resultados mostraram que embora os cinco conjuntos de dados de refletância atribuídos tenham seguido as recomendações dos guias indicados na Figura 13 e sejam os mesmos para todos os ambientes, algumas salas apresentaram variações mais significativas nos resultados ao alterar os valores de refletância do que outras. A Figura 15 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para  $DA_{300}$  em que as barras em cinza claro representam os casos em que foi utilizada a refletância máxima e as barras escuras as mínimas.

Figura 16 - Comparação entre os resultados obtidos para  $DA_{300}$



Fonte: Brembilla, Hopfe e Mardaljevic (2018)

A Figura 16 apresenta o quadro que relata a média e o desvio padrão de todos os resultados obtidos usando guias para atribuição de refletância, juntamente com seu coeficiente de variação. O coeficiente de variação (CV) é a razão entre o desvio padrão e a média de uma distribuição e representa a variabilidade em relação à sua média. A sala L7 resultou em um valor médio de DA com a menor dispersão,  $CV = 4\%$ . Já os resultados de DA para a sala M1 apresentam uma variação de  $CV = 19\%$ .

Figura 17 - Média e o desvio padrão e coeficiente de variação para os resultados de TAI e DA<sub>300</sub> obtidos a partir de diferentes instrumentos regulatórios

	L3		L7		M1		M5	
	TAI (klx hrs)	DA <sub>300</sub> (%)	TAI (klx hrs)	DA <sub>300</sub> (%)	TAI (klx hrs)	DA <sub>300</sub> (%)	TAI (klx hrs)	DA <sub>300</sub> (%)
$\mu$	2809	78	6750	87	2810	52	2197	67
$\sigma$	647	6	1152	3	472	10	454	7
$C_V$ [%]	23	8	17	4	17	19	21	11

Fonte: Brembilla, Hopfe e Mardaljevic (2018)

As medidas que consideram a Modelagem da Iluminação com Base no Clima (CBDM) representam um grande avanço para a análise de desempenho lumínico, pois permite que seja verificado o comportamento da luz nos ambientes internos durante um período mais longo, com uma magnitude e dados mais próximos à situação real. O uso de arquivos climáticos possibilita a análise da disponibilidade de luz para diferentes localidades, o que pode representar diferenças significativas quando consideramos um país de dimensão continental como o Brasil.

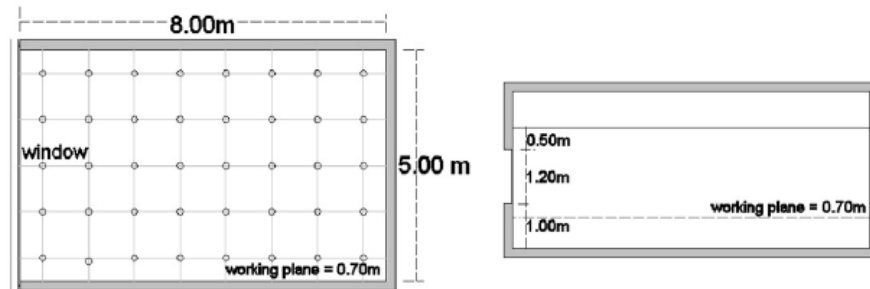
### 2.3 CONTEXTO URBANO E DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES

Em função da geometria urbana a orientação e a largura das ruas, as alturas dos edifícios circundantes e as características do meio urbano contribuem para a quantidade de luz solar direta e difusa que a fachada de um edifício e a rua adjacente recebem (SARATSIS; DOGAN; REINHART, 2016). Neste capítulo serão apresentados estudos recentes que analisam a influência do contexto urbano no desempenho lumínico dos ambientes internos, bem como estudos que analisam o comportamento da luz no meio urbano.

Capeluto (2003), investigou as influências do ambiente construído no potencial de aproveitamento de luz natural. Este estudo buscou encontrar um método simplificado de analisar obstruções urbanas em fases iniciais de projeto. Para elaborar o método, o autor se baseia na previsão do Fator de Luz Diurna Médio (DFavg) em prédios de escritórios israelenses típicos, com base no ângulo sólido do céu visível. O estudo utilizou o software Sustarc e Radiance para calcular o ângulo sólido de visibilidade (*Sky Solid Angle* – SSA) e o Fator de Luz Diurna Médio (DFavg). O objeto de análise tem 5 m de largura, 8 m de profundidade e 2,7 m de pé direito e o plano de trabalho foi considerado a 0,80 m (ver Figura 17). As janelas ocupam toda a largura do ambiente e representam 15% da área de piso. O ambiente foi

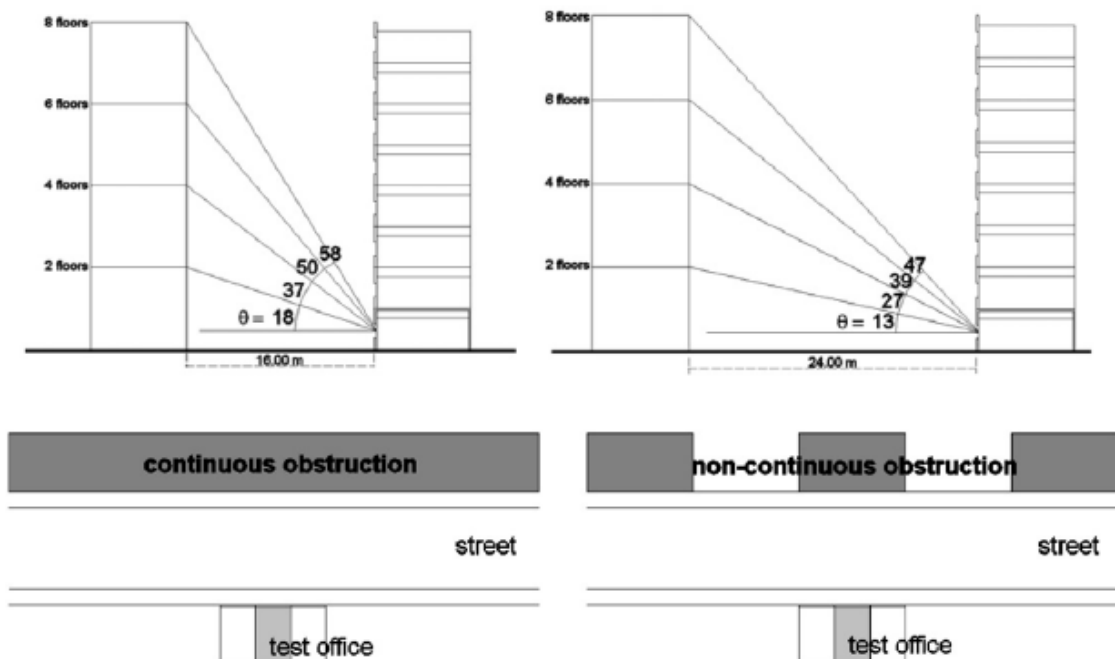
posicionado em diferentes alturas, indo do térreo até o oitavo pavimento. As refletâncias das diferentes superfícies são: paredes internas 65%, teto 80%, piso 20%, obstruções externas 40% e superfície do solo 20%. O estudo foi realizado para contextos urbanos com obstruções contínuas e não contínuas (ver Figura 18).

Figura 18 - Dimensões do ambiente analisado em planta (esquerda) e corte (direita)



Fonte: Capeluto (2003)

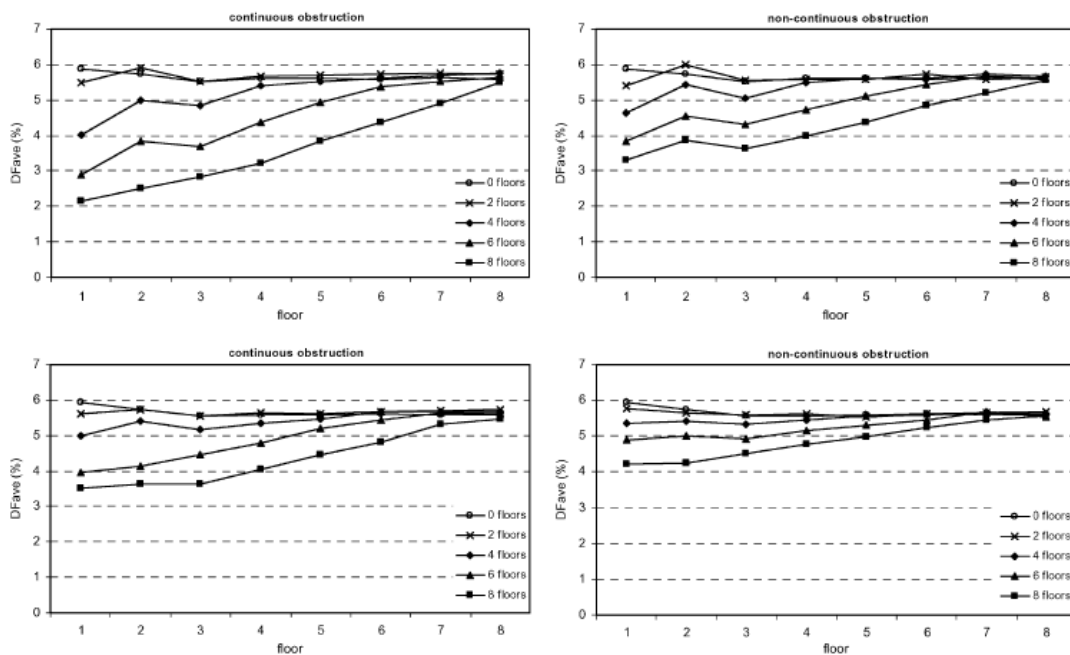
Figura 19 - Tipologias de obstrução utilizadas no estudo e ângulos de obstrução vertical utilizados



Fonte: Capeluto (2003)

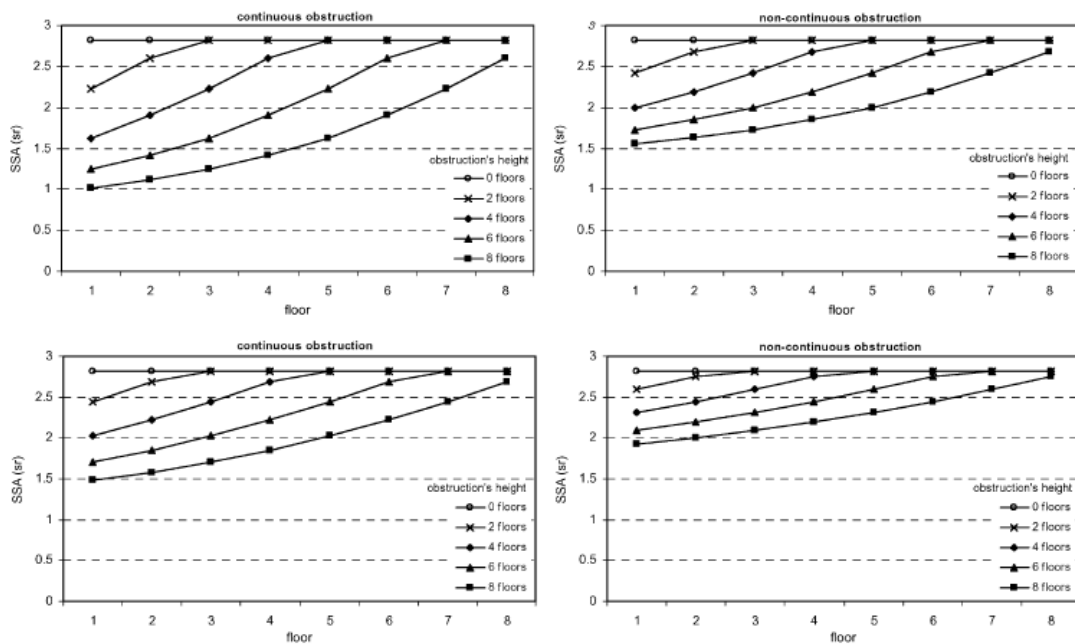
A Figura 19 apresenta os resultados obtidos para o ambiente localizado a três diferentes alturas em frente a diversas obstruções que variam de 0 a 8 pavimentos. Os gráficos superiores apresentam os resultados dos cenários com largura de rua em 16m e os gráficos inferiores os resultados para o cenário com largura de rua de 24m. Pode-se perceber que os cenários de obstrução não contínua obtiveram resultados superiores para DFavg em relação à obstrução contínua, o que está relacionado a maior visibilidade de céu. Ainda, também pode-se perceber que os cenários com largura de rua igual a 24m apresentaram resultados melhores para DFavg em relação ao cenário com largura de rua de 16m, o que pode significar uma contribuição indireta da reflexão das obstruções externas. A Figura 20 apresenta os resultados para SSA da mesma forma que foi realizada para DFavg.

Figura 20 - Resultados obtidos para DFavg



Fonte: Capeluto (2003)

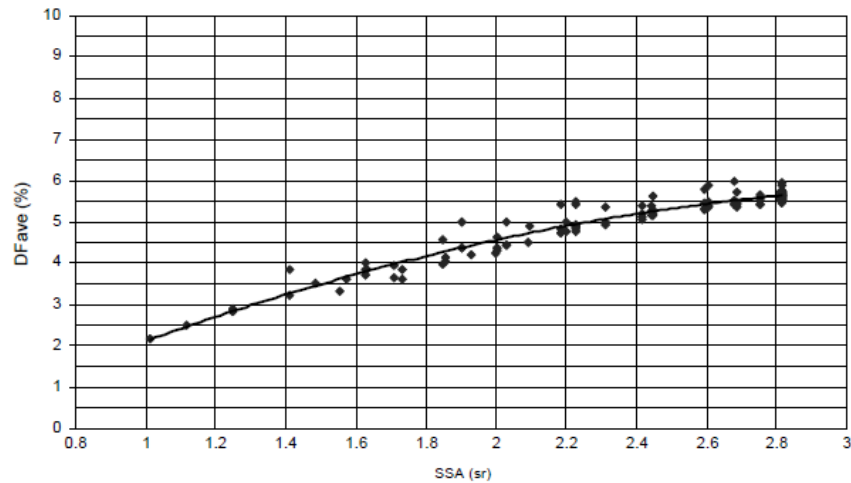
Figura 21 - Resultados obtidos para SSA



Fonte: Capeluto (2003)

Por fim, realizou-se uma análise de correlação entre os indicadores SSA e DFave. A Figura 21 apresenta o resultado desta análise. Pode-se perceber uma clara correlação entre o SSA medido do centro da janela do escritório e do DFave obtido no plano de trabalho para esse tipo de ambiente em uma mesma situação. Com isso, o autor conclui que a utilização da visibilidade de céu pode ser um bom indicador de iluminação natural em fases iniciais de projeto.

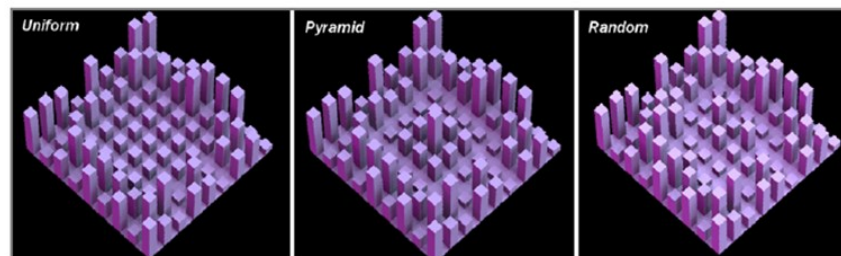
Figura 22 - Análise de correlação entre os indicadores SSA e DFave



Fonte: Capeluto (2003)

Pode-se perceber que pequenas alterações na geometria urbana já são suficientes para ganhos ou perdas expressivas de iluminação natural no ambiente interno. Em uma das etapas de um estudo realizado por Cheng et al. (2006), foram modelados contextos urbanos genéricos que foram submetidos a simulações computacionais de desempenho lumínico. Foram gerados três modelos de contextos urbanos hipotéticos um com característica uniforme, outro com característica piramidal e outro em contexto randômico. A Figura 22 apresenta os três modelos simulados. Cada modelo consiste em 25 edifícios em quadras de 5 x 5m. Os resultados obtidos mostraram que um ambiente urbano em que apresenta variações de altura, preferencialmente de forma randômica, apresenta um potencial maior de acesso à iluminação natural e potencial de aproveitamento de radiação solar. (CHENG et al., 2006).

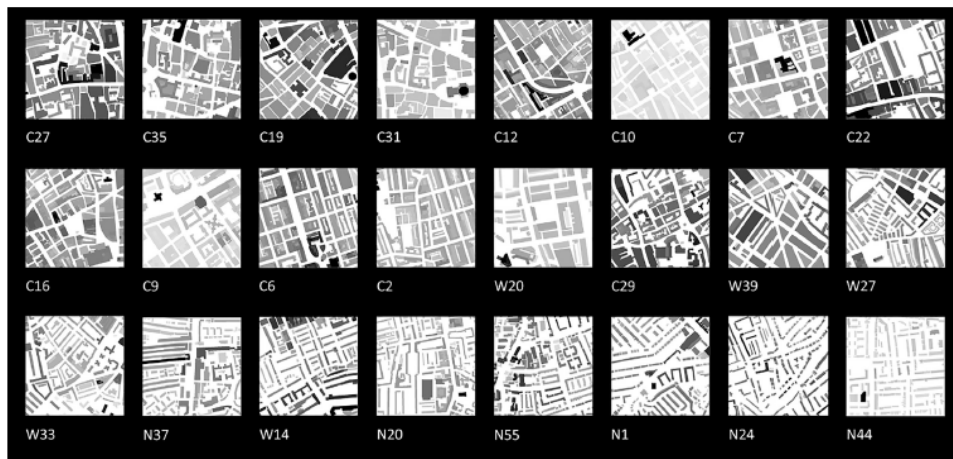
Figura 23 - Cenários urbanos genéricos uniformes, piramidal e randômico, respectivamente



Fonte: Cheng *et al.* (2006)

Acredita-se que um dos motivos do resultado deste estudo possa estar relacionado à maior visibilidade de céu este tipo de cenário. Um estudo realizado por Chatzipoulka *et al.* (2018), investigou a relação entre o parâmetro Fator de Céu Visível (*Sky View Factor* – SVF) e a radiação solar por orientação de fachada. Foram realizadas simulações computacionais para três cidades na Europa (Atenas, Londres e Helsinque), com ênfase nos resultados de radiação global anual. Um dos objetivos do estudo foi analisar separadamente as três componentes da luz: direta e difusa do céu e refletida proveniente da radiação dos edifícios do entorno. Além do período anual, foram realizadas análises mensais de inverno e verão, para os meses de janeiro e julho respectivamente, buscando investigar o comportamento da variação de altitude solar na relação de SVF e radiação solar nas fachadas, em especial para a componente direta. O estudo se baseou em 24 diferentes áreas urbanas, com área de 500mx500m, como estão exemplificadas na Figura 23.

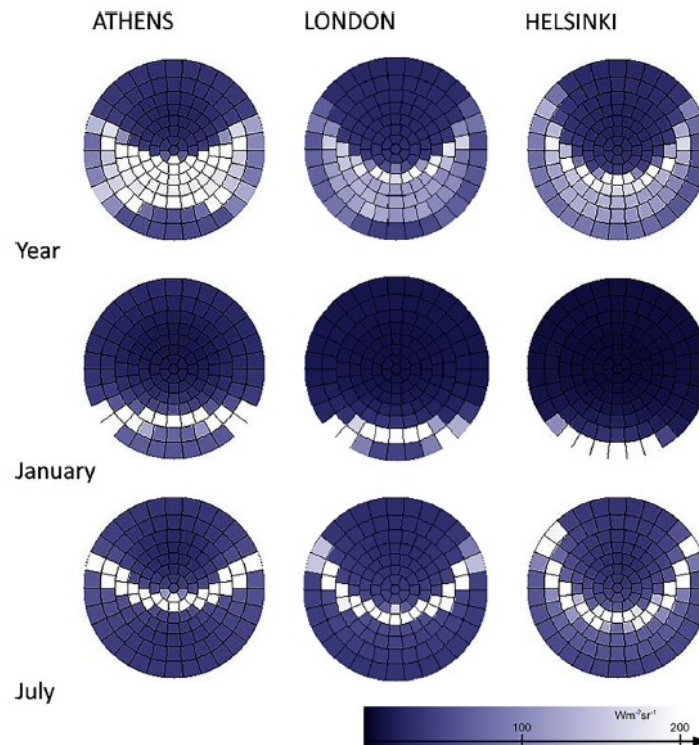
Figura 24 - Áreas urbanas utilizadas no estudo



Fonte: Chatzipoulka *et al.* (2018)

Foram gerados modelos de céu utilizando o software METEONORM, com base em arquivo climático. A Figura 24 apresenta os nove domos gerados para cada cidade para um período anual, e mensal para janeiro e julho, com os resultados em Wh/m<sup>2</sup>.

Figura 25 - Domos gerados para um período anual e mensal (janeiro e julho)



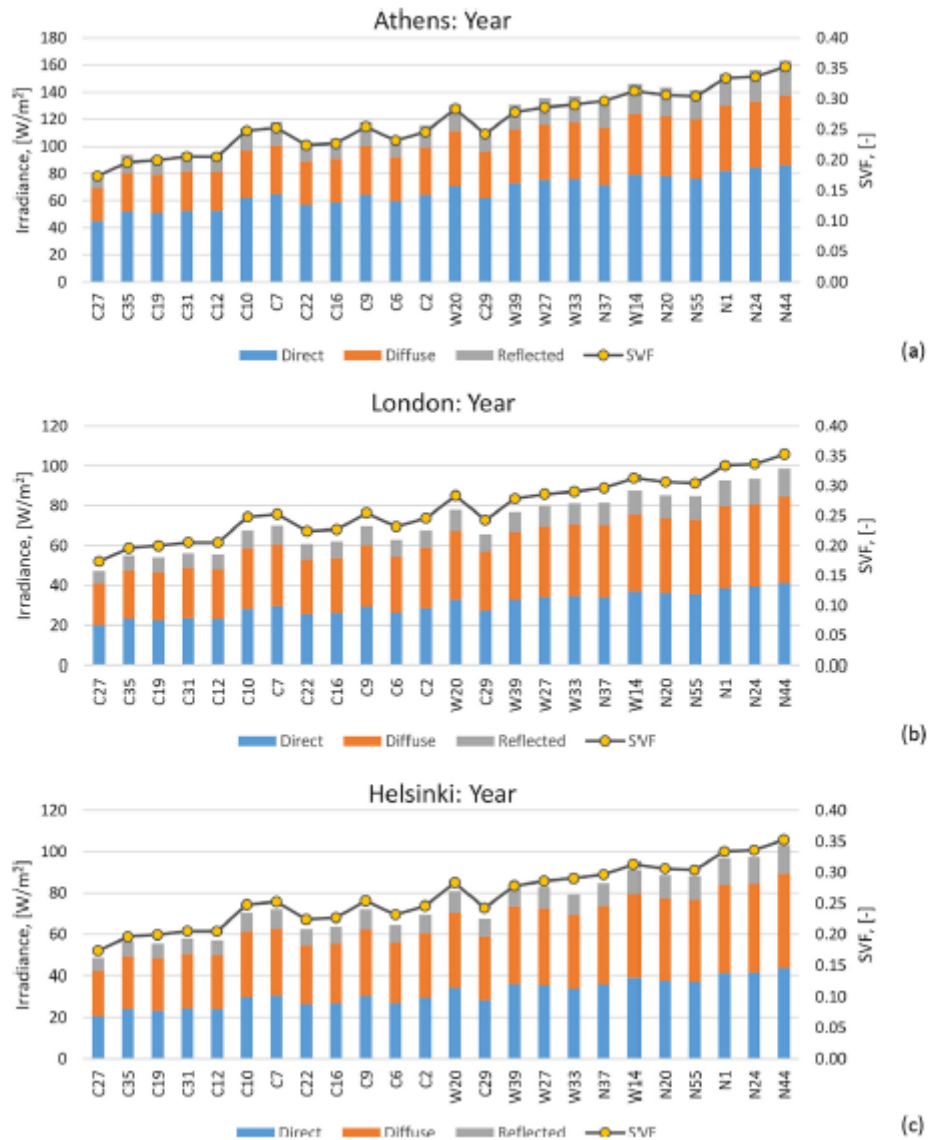
Fonte: Chatzipoulka *et al.* (2018)

Para o cálculo da componente refletida, foi considerada um albedo (refletância externa) de 0,2 para todas as superfícies do modelo e considerou-se um número de interreflexões igual a 1. Reconhece-se que o impacto relativo do número mínimo de interreflexões solares pode variar com a orientação da fachada e ser mais significativo em Atenas, visto que essa apresenta maior potencial de radiação anual, especialmente para formas urbanas de alta densidade construída. De qualquer forma, definir o número mínimo de interreflexões é uma limitação das simulações de radiação refletida neste estudo e foi considerado ao interpretar os respectivos resultados.

Os resultados mostraram que para Londres e Helsinque, a média de radiação global anual recebida na fachada corresponde a 42 – 43% para radiação direta, 44 – 45% para radiação difusa e 13-14% para a componente refletida. Para estas cidades o céu difuso contribui de forma significativa em detrimento das outras componentes da luz. Em contrapartida, para Atenas, a radiação direta tem um impacto substancialmente maior em comparação com a radiação difusa. Os resultados mostram uma contribuição de 53-56% para radiação direta, 30-31% para radiação difusa e 14-16% para a componente refletida (ver Figura 25).



Figura 26 - Resultados de radiação direta (azul), difusa (laranja e refletida (cinza) e sua relação com SVF (linha)



Fonte: Chatzipoulka *et al.* (2018)

O estudo gerou 1080 testes de análise de regressão, usando como amostra milhares de pontos de fachada. A Figura 26 apresenta os resultados do  $R^2$  plotados em gráficos polares e apresentados por cidade. As linhas coloridas representam as variações do  $R^2$  com orientação solar, para a radiação global (azul), direta (vermelho), difusa (magenta) e refletida (ciano). Com relação à radiação difusa, sua relação com o SVF é quase perfeitamente linear, independentemente da orientação e localização, com as linhas magentas quase coincidindo com

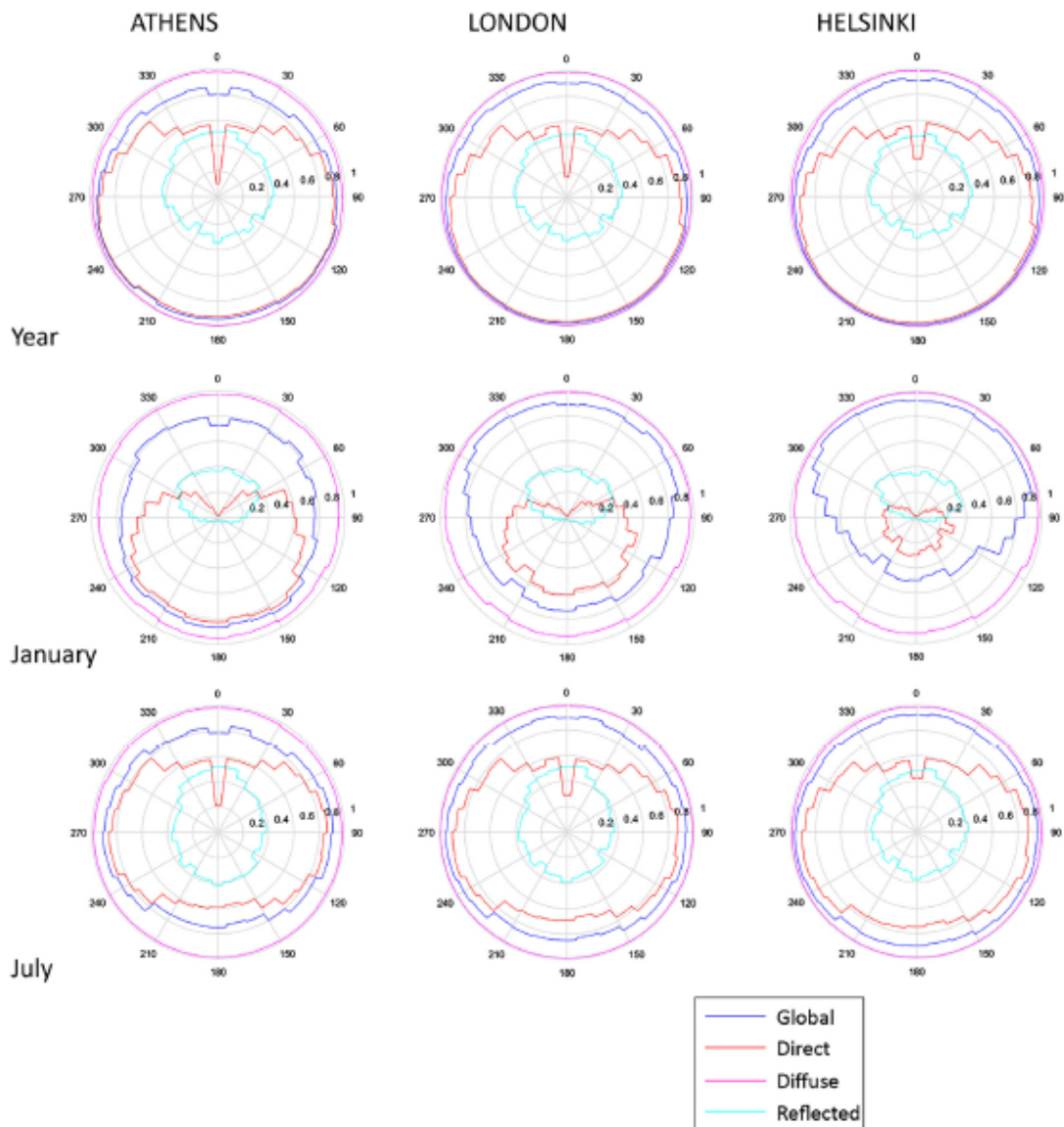
o círculo externo. Isso era esperado pois o SVF mede a abertura de um ponto para o céu e a distribuição da radiação difusa no céu é relativamente uniforme.

Em relação à radiação direta e refletida, os formatos das linhas, vermelho e ciano, também são muito semelhantes nas três cidades. A relação entre SVF e a radiação direta é claramente afetada pelo azimute da fachada. Nota-se que é mais forte nas orientações sul e mais fraco à medida que se desloca para o norte. É importante ressaltar que o  $R^2$  permanece acima de 0,8 para a maioria das orientações que recebem maior incidência de sol ao longo do ano - aproximadamente entre  $60^\circ$  e  $300^\circ$  de azimute - nas três cidades, apesar de a disponibilidade de radiação solar direta em Helsinque e Londres ser notavelmente reduzida em comparação com Atenas.

Analisando a relação entre SVF e a componente refletida o estudo apontou que a correlação é significativamente mais fraca. O  $R^2$  é maior nas fachadas orientadas a Norte do que nas orientadas a Sul. Presumivelmente, se as interreflexões solares fossem definidos em 2 nas simulações, em vez de 1, as diferenças entre as orientações Norte e Sul seriam menores.

Por fim, no que diz respeito à radiação global anual, a relação com a radiação difusa mensal parece quase perfeitamente linear em todos os casos. Em relação à radiação refletida, os valores de  $R^2$  são muito semelhantes para os três locais, por mês. Em janeiro, para orientações voltadas para sul, o  $R^2$  está próximo de zero, indicando que não há correlação entre SVF e a componente refletida; para a sul, o  $R^2$  é relativamente maior, mas ainda denota um relacionamento muito fraco. Em julho, a correlação parece mais forte e a diferença nos valores de  $R^2$  entre as orientações voltadas para o Norte é reduzida. No entanto, o  $R^2$  não excede 0,6 em qualquer orientação. A única relação que apresenta diferenças significativas ao comparar os três locais é a SVF com a radiação direta. Especialmente em janeiro, sua força é substancialmente afetada pelas latitudes das cidades, diminuindo com o aumento da latitude. Em julho, quando as altitudes solares médias são significativamente maiores, a relação entre SVF e radiação direta se torna muito mais forte, e as diferenças entre as três cidades são menos evidentes.

Figura 27 - Resultados de correlação para radiação difusa (magenta), global (azul), direta (vermelho) e refletida (ciano)

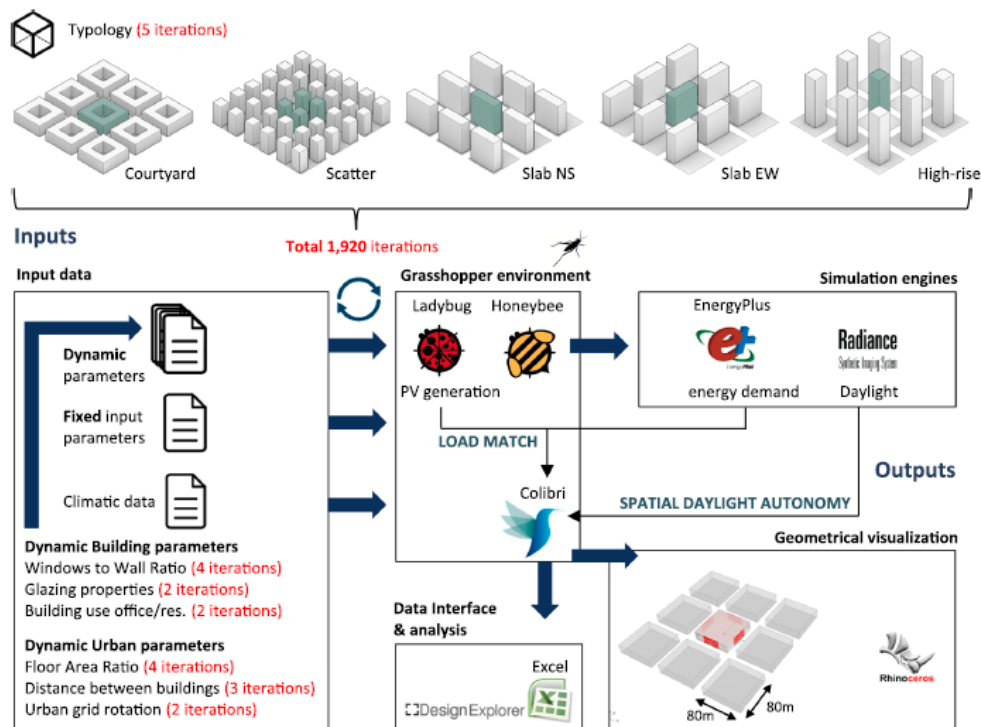


Fonte: Chatzipoulka *et al.* (2018)

Como conclusões, o estudo demonstrou que a relação entre o Fator de Céu Visível (SVF) e a radiação global anual em fachadas verticais é linear e forte, com um  $R^2$  acima de 0,8 para as 30 orientações de fachada analisadas, independentemente da localização. Os resultados mostraram que a capacidade do SVF prever a radiação global de forma mensal é relativamente limitada e varia substancialmente dependendo da localização. Este comportamento se dá pelo efeito da altitude solar em relação ao SVF e a radiação direta mensal.

Um estudo realizado por Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019) analisou as vantagens e desvantagens de cinco tipologias urbanas representativas no balanço energético e desempenho de luz natural no contexto de climas quentes e secos do Mediterrâneo. Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado um modelo teórico de malha urbana com nove quadras em que o modelo de bloco de proporções  $80\text{m} \times 80\text{m}$  foi colocado no centro da quadra, cercado por geometrias de bloco idênticas. Os dados de entrada da malha urbana foram informados pelas diretrizes do Ministério da Construção de Israel, do Movimento para o Urbanismo Israelense (MIU) e do *Israel Green Building Council* (ILGBC). Foram definidos cenários urbanos representando uma combinação de tipologias contemporâneas (dispersão - *scatter*, arranha-céus - *high-rise*) e layouts de edifícios tradicionais: blocos em fita - *slab* (orientação norte-sul e leste-oeste) e edifícios de miolo de quadra - *courtyard* (ver Figura 27). A modelagem foi realizada no software Rhinoceros/Grasshopper e as simulações utilizaram os *plug-ins Lady Bug e Honey Bee*, os quais possuem os softwares *EnergyPlus* e *Radiance* inclusos que permitem as simulações de balanço térmico e iluminação natural, respectivamente. A Figura 27 apresenta os parâmetros utilizados no estudo.

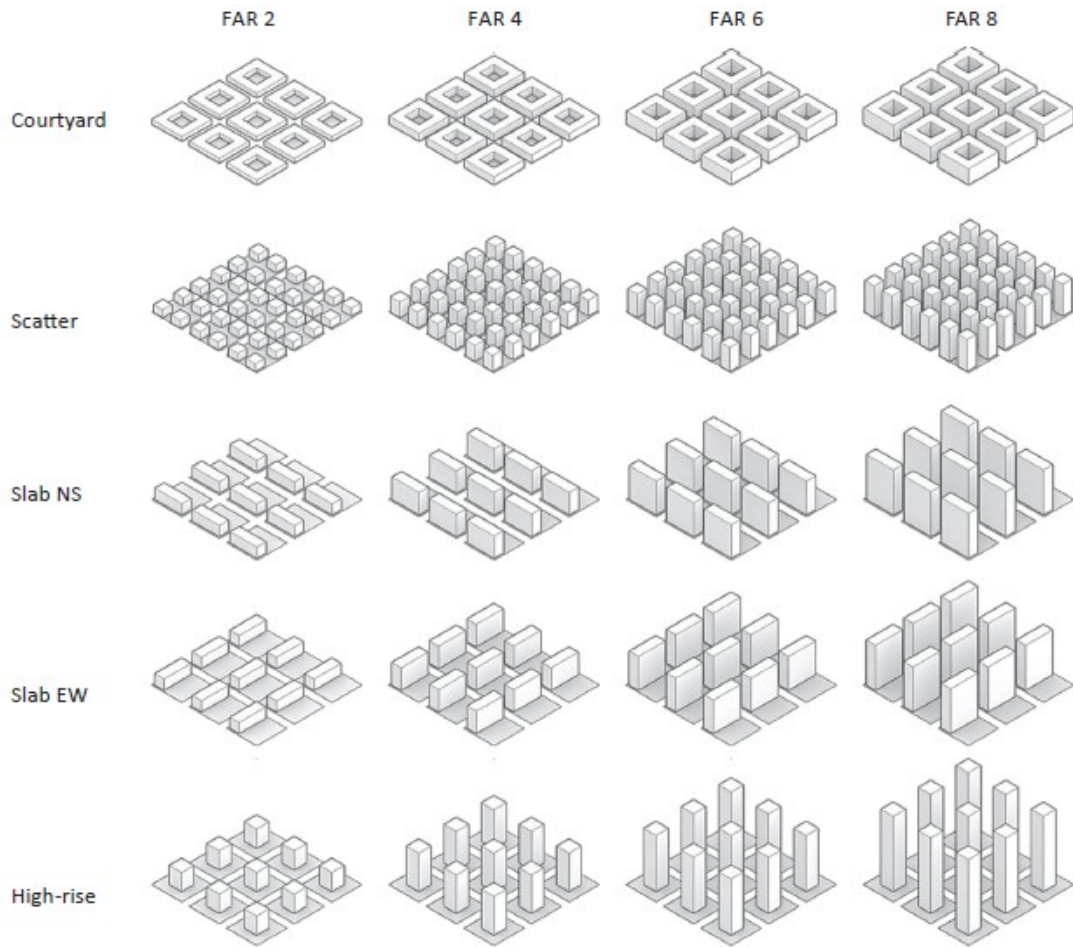
Figura 28 - Tipologias urbanas utilizadas e dados de entrada das simulações



Fonte: Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019)

As variáveis parametrizadas no estudo foram: área de fachada envidraçada (*Window-to-wall-ratio* -WWR), propriedades dos vidros, distância entre edifícios, rotação da malha urbana, relação de área útil ou índice de aproveitamento (FAR – *Floor Area Ratio*) e uso do edifício. Como a taxa de ocupação dos edifícios foi predefinida pelas tipologias dos edifícios, o FAR foi usado para alterar o número de pavimentos em cada iteração. Para cada valor distante (2, 4, 6 e 8), o algoritmo calculava automaticamente a nova altura de cada bloco, como mostra a Figura 28. A medida utilizada para analisar iluminação natural foi o sDA (*Spatial Daylight Autonomy* ou Autonomia de Luz Natural Espacial) para 300 lux em 50% das horas anuais de ocupação. Foi considerado um ambiente de planta livre no pavimento mais baixo buscando avaliar a condição mais restritiva. Foi definida uma malha de 2 metros, 3 interreflexões (*ambiente bounces*), sem aplicação de persianas automatizadas e considerando um horário de ocupação das 8:00 – 18:00.

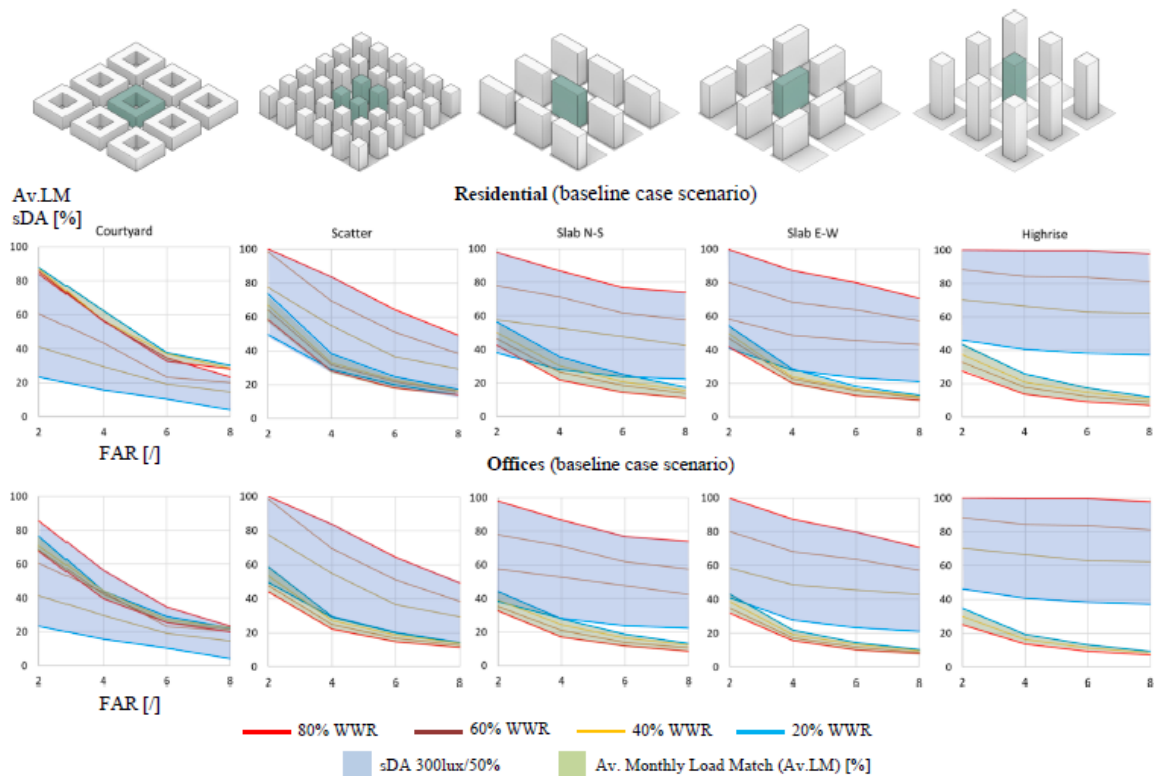
Figura 29 - Variações de altura de acordo com o índice FAR para cada tipologia



Fonte: Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019)

Como resultados, percebe-se o impacto inverso entre o WWR e os valores obtidos para balanço energético e iluminação natural, considerando quatro diferentes áreas envidraçadas para cada uma das cinco tipologias em diferentes cenários de densidade, como apresenta-se na Figura 29. Os resultados indicam que, mesmo em densidades mais altas, a WWR é um fator determinante para o desempenho da luz do dia, apesar do sombreamento das construções vizinhas. Embora tenham sido registrados diferentes valores de sDA e Av.LM para as cinco tipologias, o efeito das variações da WWR no desempenho de energia e luz natural mostrou uma tendência semelhante.

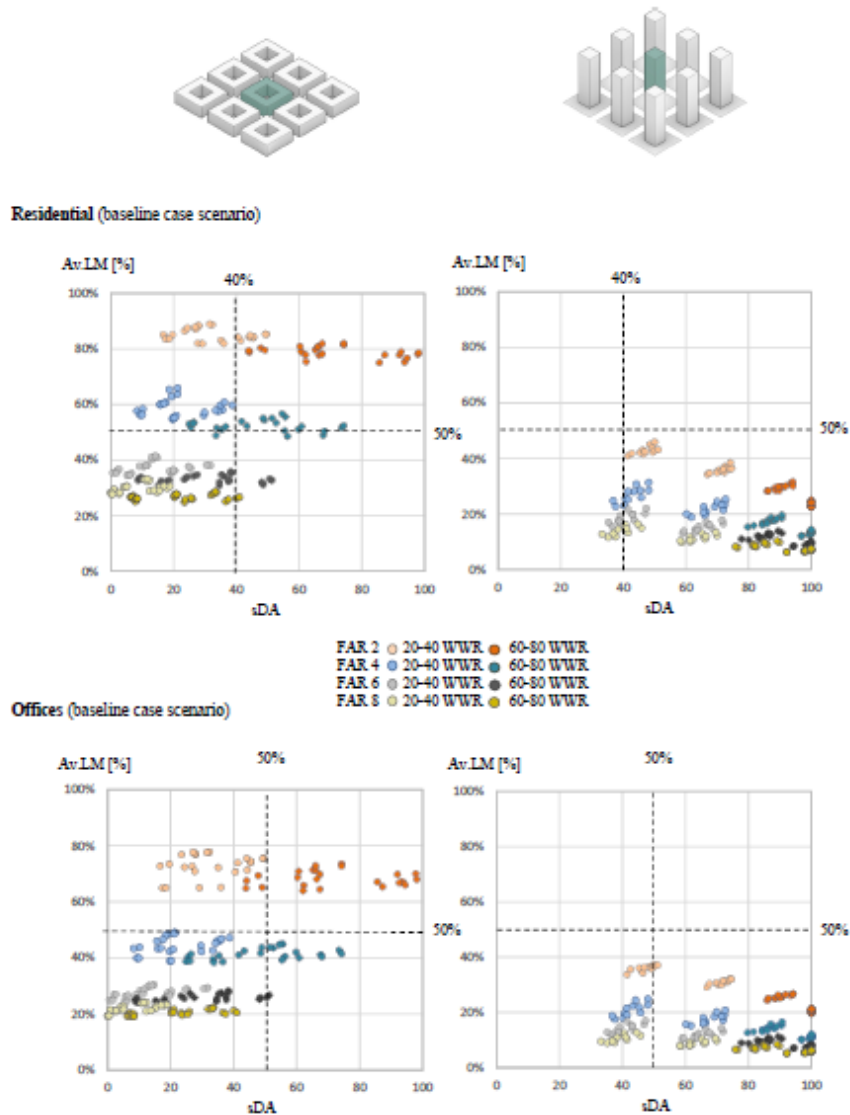
Figura 30 - Resultados obtidos para as diferentes tipologias



Fonte: Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019)

A Figura 30 mostra a correlação entre os resultados obtidos para balanço energético e iluminação natural para as tipologias urbanas de miolo de quadra (*courtyard*) e arranha-céus (*high-rise*) para ambientes residenciais e comerciais. Os resultados mostram que para edifícios de miolo de quadra (*courtyard*) um valor maior de WWR é mais favorável, pois quando este indicador é menor os resultados mostram melhorias marginais no balanço de energia, mas o desempenho de luz natural fica substancialmente baixo. Por outro lado, em arranha-céus (*high-rise*), uma menor taxa de WWR é favorável, pois os níveis de luz natural são suficientes enquanto o balanço energético é significativamente aprimorado.

Figura 31 - Resultados de correlação entre desempenho e luz natural e balanço energético



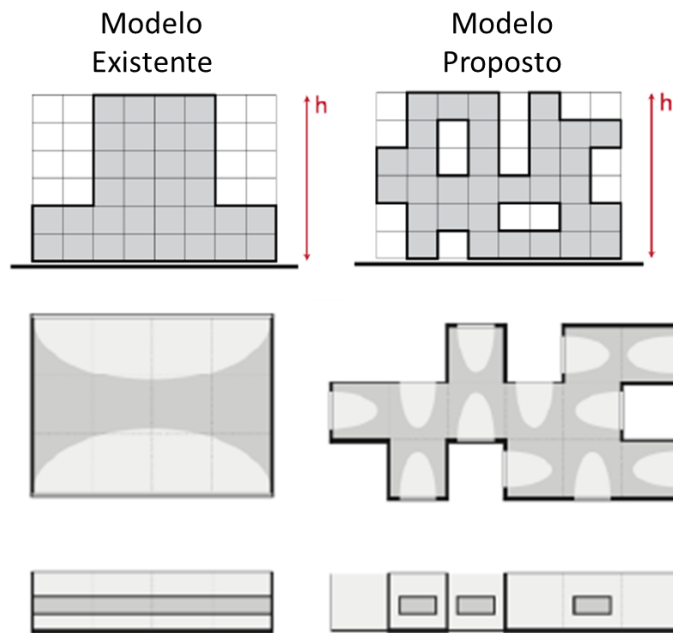
Fonte: Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019)

Um estudo desenvolvido por Zandavali (2019) apresentou um estudo com semelhantes tipologias de quadra em que foi proposta uma metodologia em que é possível aumentar a flexibilidade da construção. A proposta dessa flexibilização é melhorar o desempenho lumínico com índices de densidade máxima propostos pelo plano diretor de Porto Alegre. A pesquisa foi desenvolvida por meio de programação visual utilizando o conceito de celular automata com o objetivo de otimizar o número de vazios para um determinado bloco. O software utilizado para a otimização da forma foi o Rhinoceros/Grasshopper e as análises de luz natural foram realizadas por meio do plug-in *Urban Daylight* (UD). As medidas de análise utilizadas foram Autonomia de Luz Natural Espacial (*Spatial Daylight Autonomy* – sDA) e Autonomia de Luz



Natural Continua (*Continuous Daylight Autonomy – cDA*). A Figura 32 apresenta o conceito de que trata o estudo. Para determinar a otimização da forma urbana foi selecionada uma determinada área urbana existente para usar sua geometria simplificada como base. A forma otimizada gerou vazios que possibilitam maior área iluminada, como apresentado na Figura 32.

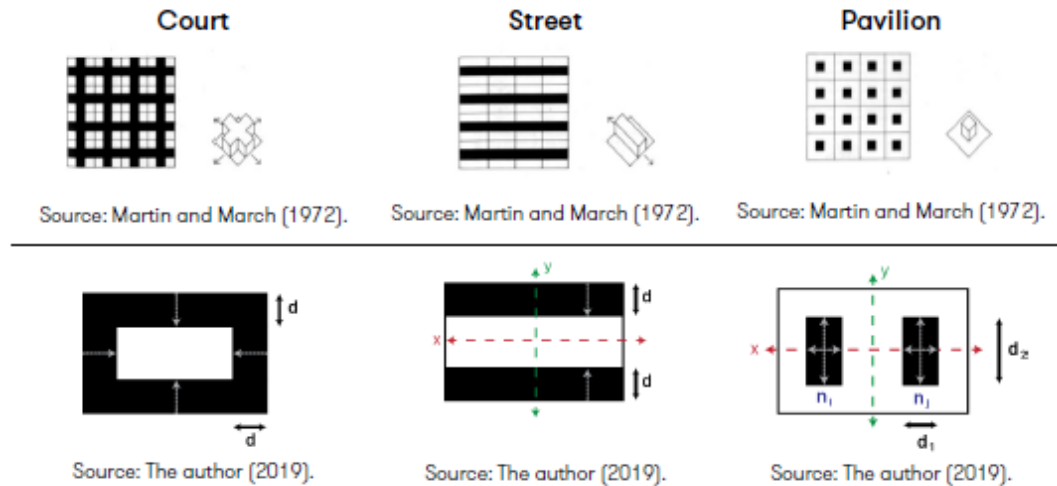
Figura 32 - Conceito utilizado para otimização da forma urbana



Fonte: Adaptado de Zandavali (2019)

As otimizações foram realizadas utilizando como base em três tipologias morfológicas miolo de quadra (*court*), rua (*street*) e pavilhão (*pavilion*), como é apresentado na Figura 33.

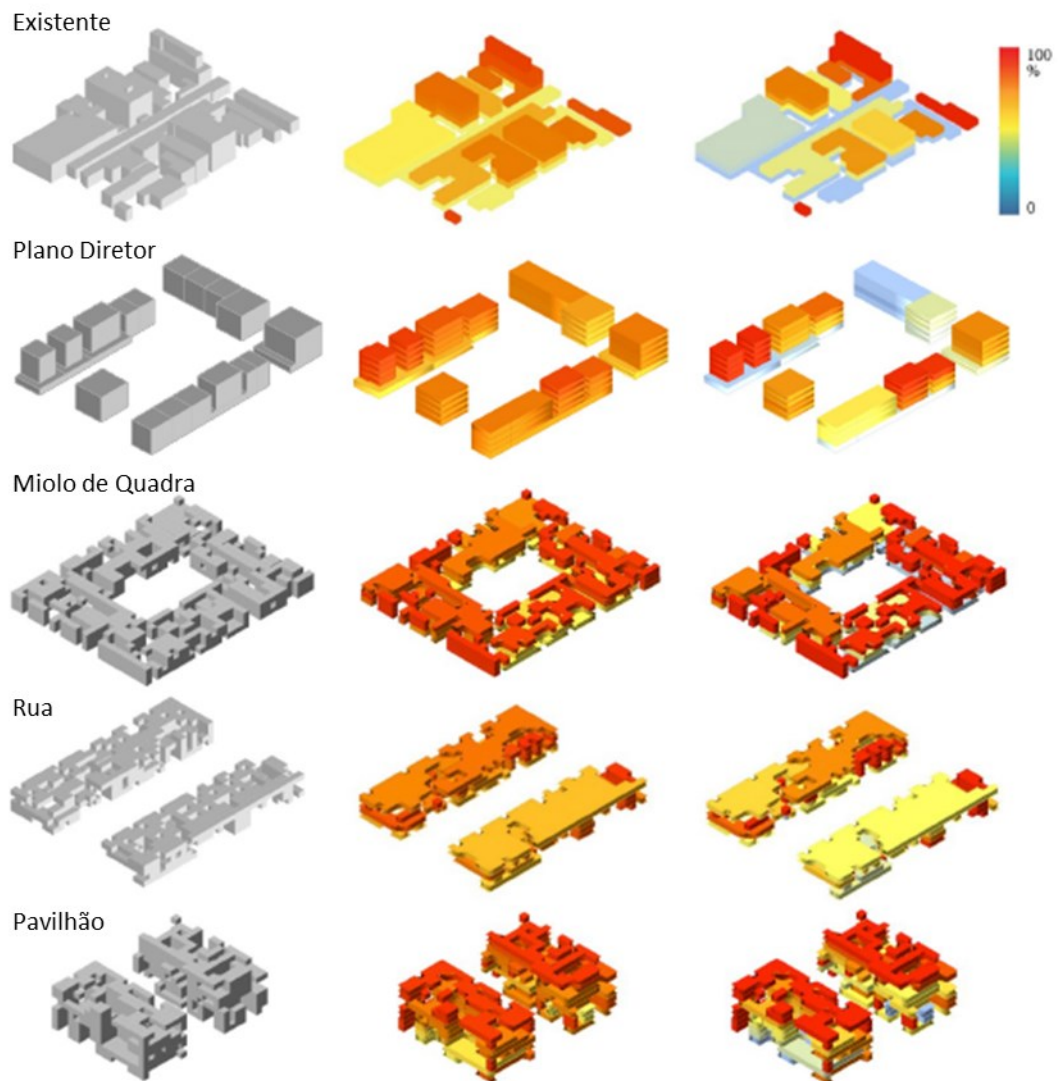
Figura 33 - Tipologias de quadra utilizadas na otimização do estudo



Fonte: Zandavali (2019)

A Figura 34 apresenta os resultados obtidos considerando um índice de aproveitamento igual a 1,3. Os resultados de  $sDA_{300/50\%}$  foram de 42%, 57%, 64%, 58% e 62%, para o modelo existente, plano diretor, miolo de quadra, rua e pavilhão, respectivamente. Os resultados obtidos para  $cDA_{300}$  foram 59%, 73%, 74%, 72% e 73%, para o modelo existente, plano diretor, miolo de quadra, rua e pavilhão, respectivamente. Pode-se observar que todos os cenários estudados apresentaram resultados superiores em relação ao modelo atual. A morfologia de miolo de quadra foi a que obteve os melhores resultados nessa condição de índice de aproveitamento.

Figura 34 - Resultados obtidos para índice de aproveitamento igual a 1,3

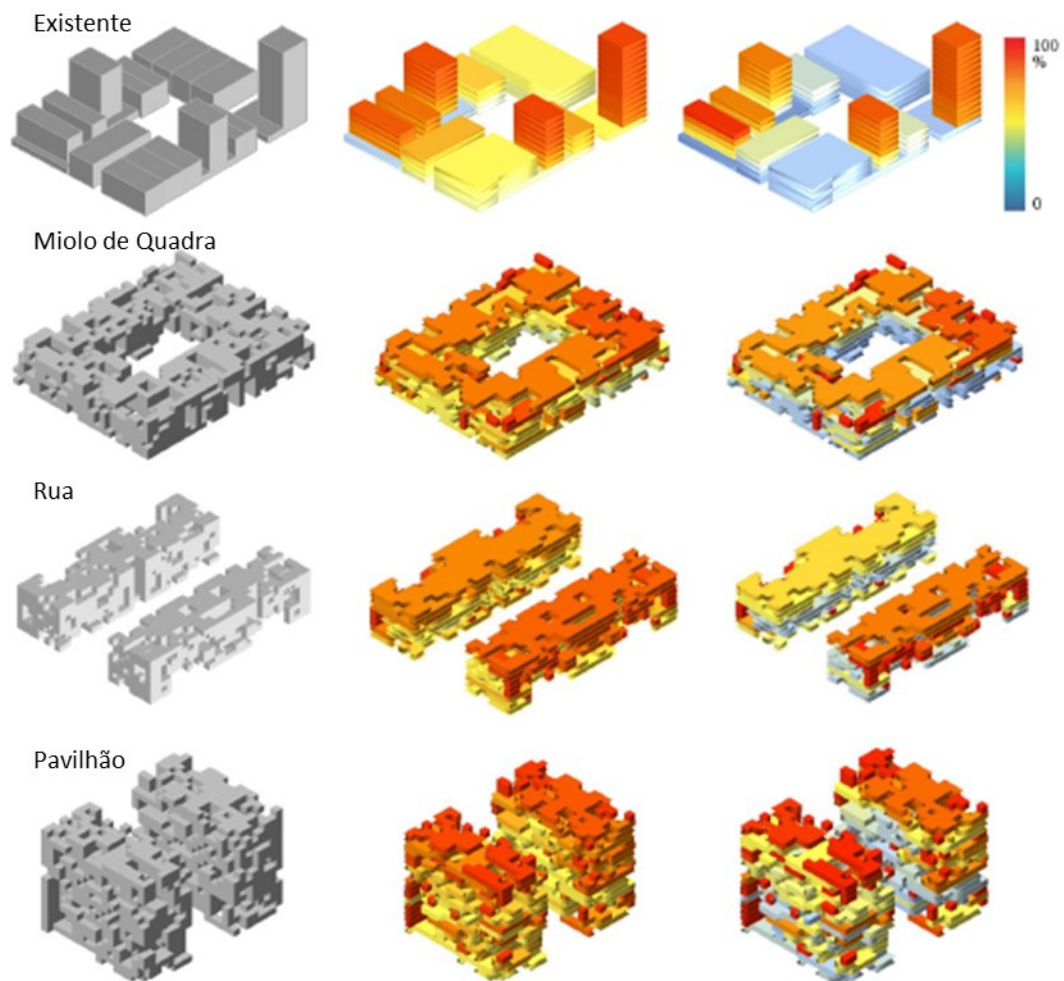


Fonte: Adaptado de Zandavali (2019)

Na Figura 35, são apresentados os mesmos cenários quando analisados considerando um índice de aproveitamento igual a 3,0. Os resultados de  $sDA_{300/50\%}$  foram de 42%, 40%, 48% e 47%, para o modelo existente, plano diretor, miolo de quadra, rua e pavilhão, respectivamente. Os resultados obtidos para  $cDA_{300}$  foram 59%, 58%, 65% e 63%, para o modelo existente, miolo de quadra, rua e pavilhão, respectivamente. Pode-se perceber que, diferentemente do cenário anterior (índice de aproveitamento 1,3), neste cenário a morfologia de miolo de quadra apresentou o pior resultado, com valores abaixo inclusive do modelo existente. Os cenários de

rua e pavilhão apresentaram resultados melhores, superando o valor obtido para o modelo existente em torno de 5% a mais de área iluminada. Este resultado mostra o impacto da geometria urbana no seu desempenho lumínico, uma vez que para o edifício de miolo de quadra a aumento de altura tem impacto significativo, para os edifícios de rua e pavilhão o efeito de ‘altura’, não é tão expressivo.

Figura 35 – Resultados obtidos para índice de aproveitamento 3,0



Fonte: Adaptado de Zandavali (2019)

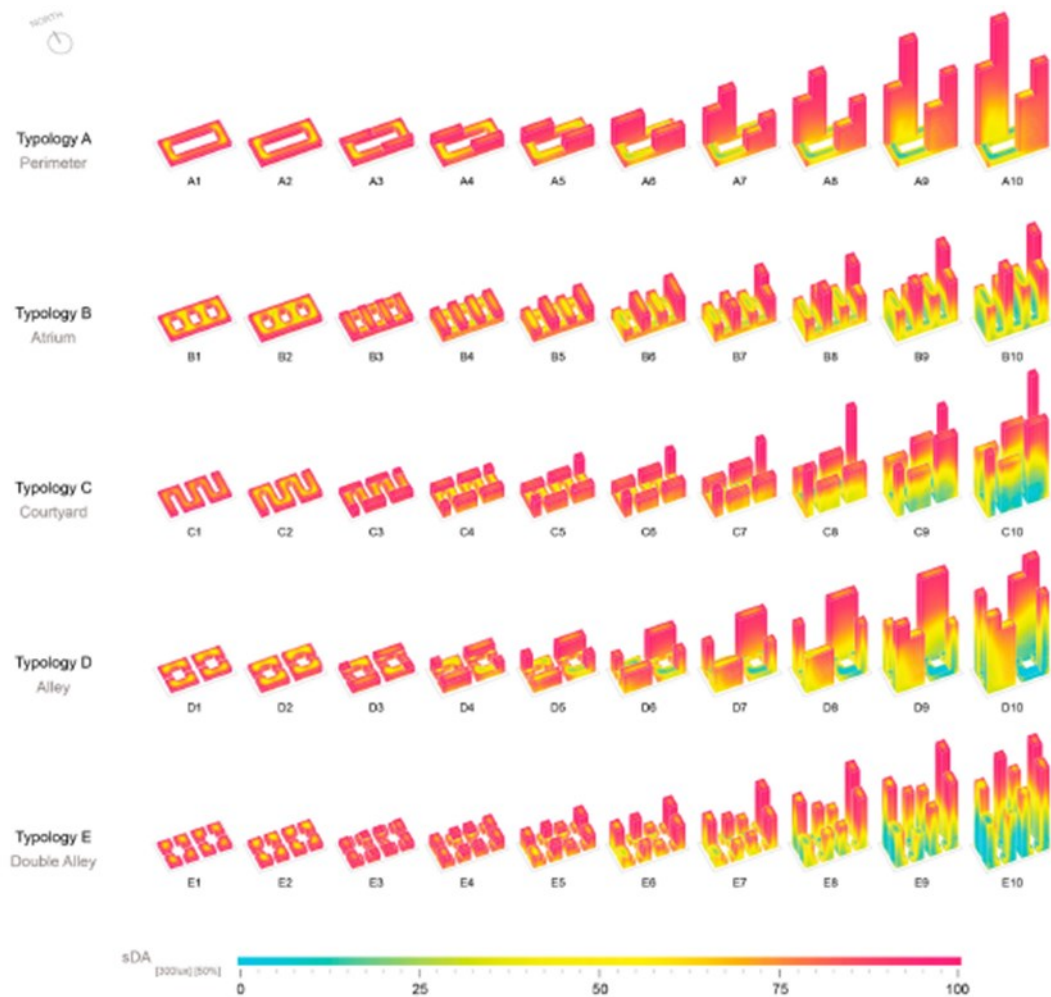
Assim como no estudo de Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019), na pesquisa de Zandavali (2019), também fica evidente que existem morfologias que são mais afetadas pelo aumento de altura e outras que são menos. Logo o uso de índices para caracterizar a geometria urbana não apresenta uma boa correlação com o desempenho lumínico.

Saratsis, Dogan, Reinhart (2016) realizaram um estudo em que foram questionadas as orientações de planejamento e zoneamento urbano estabelecidas na cidade de Nova Iorque para iluminação natural. Os autores argumentam que as leis de zoneamento vigentes apresentam uma série de limitações, em se tratando do acesso à iluminação natural.

Os autores realizaram um estudo em que foram desenvolvidas simulações de blocos de 140 x 60m, considerando que essas são as dimensões médias dos blocos em áreas de alta densidade no centro de Manhattan. A largura da rua foi definida em 20 metros e os blocos foram orientados a Norte e Sul. Foram consideradas 5 tipologias urbanas (A - E) e foi desenvolvido um esquema de crescimento em altura produzindo diversas densidades, mas mantendo as características formais de cada tipologia, conforme apresentado na Figura 33. O crescimento em altura proposto segue uma gradual extrusão da camada base de cada bloco aumentando as alturas até que um limite de 6 níveis fosse atingido. A partir desse limite a camada passa a crescer em forma de torre até atingir um limite máximo de 50 andares.

As simulações analisaram a métrica de iluminação natural Autonomia de Luz Natural Espacial para um alvo de 300 lux para 50% das horas ocupadas ( $sDA_{300/50\%}$ ) distribuídas em um plano de trabalho localizado a 0,76 m do piso para os 50 modelos gerados. Os autores consideraram que todas as tipologias teriam a fachada inteira envidraçada (100% PAF) com uma transmissão visível reduzida de 50%. Superfícies opacas foram simuladas considerando uma refletância de 20%. A Figura 36 também apresenta os resultados das simulações de  $sDA_{300/50\%}$  com a visualização dos mapas de distribuição de Autonomia de Luz Natural em cores falsas.

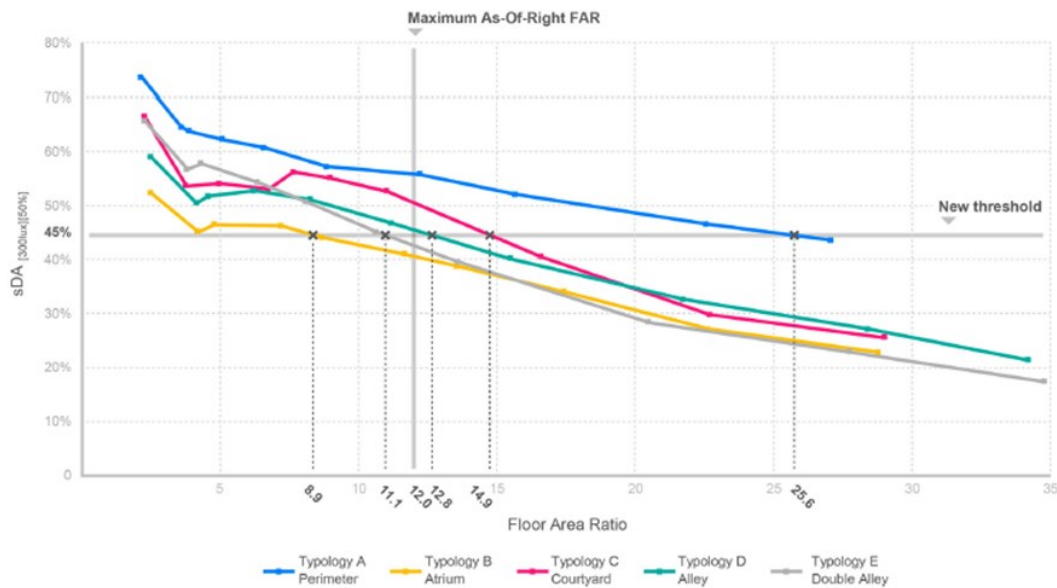
Figura 366 - Evolução das tipologias de blocos utilizados com resultados das simulações computacionais geradas



Fonte: Saratsis; Dogan; Reinhart (2016)

Baseados em estudos anteriores dos próprios autores, definiu-se que 45% da área de piso pode ser considerado um valor mínimo aceitável para a qualidade de iluminação natural considerando  $sDA_{300/50\%}$ . A Figura 37 apresenta a relação entre os valores de Autonomia de Luz Natural Espacial (sDA) obtidos para cada um dos índices de aproveitamento (FAR). De acordo com a Figura 37 pode-se perceber que a tipologia que apresentou piores resultados foi a B, átrio, em que o índice de aproveitamento máximo que a tipologia pode utilizar para garantir um  $sDA_{300/50\%}$  em 45% da área é 8,9. Já a tipologia que apresentou melhores resultados foi a tipologia A, perimetral, em que é possível atingir um índice de aproveitamento de até 25,6 garantindo um  $sDA_{300/50\%}$  em 45% da área. Com isso, pode-se notar que a existência de vazios urbanos ocasionados por uma menor taxa de ocupação do solo permite obter valor mais altos de iluminação natural mesmo em alturas mais elevadas.

Figura 37 - Relação sDA e FAR



Fonte: Saratsis; Dogan; Reinhart (2016)

Um estudo realizado por Strømman-Andersen e Sattrup (2011) buscou analisar a variação de iluminação natural e energia considerando diferentes proporções entre altura dos edifícios e largura da rua. O estudo foi realizado por meio de simulações computacionais para a cidade de Copenhagen. Em Copenhagen, a inclinação solar é bastante baixa, particularmente no inverno,  $11^\circ$  no solstício de meio-dia de inverno,  $58^\circ$  no verão, o que significa que a radiação solar direta é mais impactante apenas nos andares superiores e nos telhados superiores de ambientes urbanos densos no inverno.

Foram definidos 6 diferentes ambientes urbanos que variaram a proporção de altura/largura de 3,0 a 0,5. Cada ambiente urbano foi definido por edifícios de cinco pavimentos, totalizando uma altura de 15 metros. Foram definidas refletâncias de 20% para o piso externo e as 45% para paredes externas. Com relação à área de abertura de janela em relação à área total de parede, foram definidas 20% para ambientes residenciais e 40% para ambientes comerciais.

O *software* utilizado para a realização das simulações foi *Autodesk Ecotect Analysis* 2010. As simulações de iluminação utilizaram o *software Radiance*, acessado por meio da interface *Ecotect* para gerar simulações dinâmicas. A medida utilizada pela análise foi de

Autonomia de Luz Natural. Os cálculos de energia utilizaram a ferramenta *IES-Virtual Environment 6.0.2, ApacheSim/RADIANCE*, que possibilita a integração entre simulações termo-energéticas e de iluminação natural. Dessa forma foi possível obter resultados detalhados de consumo de energia para o sistema de iluminação artificial, ventilação mecânica, aquecimento, resfriamento e temperatura operativa interna. A energia foi medida pelo consumo de energia primária de acordo com o regulamento Dinamarquês para edifícios. Assumiu-se que o sistema de refrigeração possuía um valor de COP (Coeficiente de Performance) de 2,5, o que significa que o consumo de eletricidade para resfriamento é contado por um fator 2,5 para 1 (refrigeração igual a eletricidade). Considerou-se que o edifício foi equipado com sistema de aquecimento central e a fonte de aquecimento considerada como tendo uma eficiência de 1 a 0,8.

A Figura 38 apresenta a média diária da distribuição da radiação no ambiente urbano considerando as orientações solares Norte-Sul. Os valores calculados representam a combinação entre radiação direta e difusa considerando uma base anual. A distribuição das curvas de radiação é influenciada pelo ângulo de incidência, a combinação entre as radiações direta e difusa e a refletividade das superfícies. Quando os níveis de radiação são convertidos em níveis de iluminação natural, percebe-se uma grande assimetria na distribuição de luz nos diferentes ambientes urbanos quando são comparados níveis de iluminação natural acima de 1000 lux (Fig. 39) e níveis de iluminação natural abaixo de 500 lux (Fig. 40).

Figura 388 - Média diária da distribuição da radiação no ambiente urbano



Fonte: Strømman-Andersen; Sattrup (2011)

Figura 399 - Níveis de iluminação natural anual acima de 1000 lux



Fonte: Strømman-Andersen; Sattrup (2011)



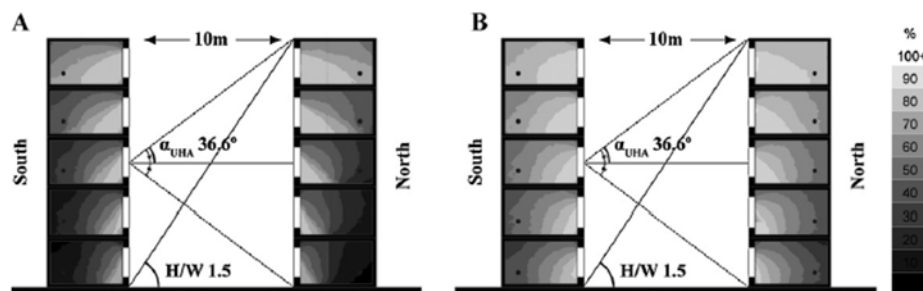
Figura 40 - Níveis de iluminação natural anual acima de 500 lux



Fonte: Strømman-Andersen; Sattrup (2011)

A refletância externa no ambiente urbano também afeta significativamente a distribuição da luz natural. A Figura 41 apresenta uma comparação em um ambiente urbano com via de 10 metros de largura considerando refletâncias externas das paredes de 45% (A) e 75% (B), respectivamente. Pode-se perceber uma significativa alteração na distribuição de luz nos ambientes internos. No ambiente urbano de baixa refletância (45%), a curva de autonomia de luz natural de 80% é quase idêntica aos ângulos de obstrução vertical que são definidos pelo edifício oposto, tornando a luz do dia quase exclusivamente dependente da visão de céu.

Figura 41 - Distribuição de iluminação natural no interior do ambiente



Fonte: Strømman-Andersen; Sattrup (2011)

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no levantamento apresentado no tópico 2.1, pode-se perceber que não existe correlação entre os índices urbanísticos que controlam o adensamento das cidades e as medidas utilizadas para avaliar luz natural presentes em normativas referentes ao desempenho de edificações. Os planos diretores no Brasil não possuem nenhuma forma simplificada de análise da luz natural, assim, a volumetria urbana é controlada apenas por meio dos índices urbanísticos em que se desconsidera o tecido urbano existente. Além disso, o parcelamento do solo se apresenta muitas vezes de forma irregular em decorrência de desmembramentos ocasionados

por acordos de compra e venda de lotes por parte do setor privado. Sendo assim, a geometria urbana das cidades tem se apresentado heterogênea e descontínua. Há uma necessidade de entender como a geometria urbana com suas mais variadas características está influenciando na disponibilidade de luz natural nos ambientes internos, tanto de edificações já existentes como do que será construído.

Estudos apontam o conceito de visibilidade de céu como o melhor indicador para avaliar o acesso a luz natural (LEDER, 2007; NG, 2003, CAPELUTO, 2003), principalmente em fases iniciais de projeto em que o projeto arquitetônico não tem muitas definições. A visibilidade de céu pode ser identificada por meio de parâmetros como Fator de Céu visível como também por meio da combinação de ângulos horizontais e verticais. As combinações desses ângulos são apresentadas tanto nos parâmetros Janela de Céu Preferível como Área de Visão Desobstruída, vistos no tópico 2.2.

Ambos os parâmetros foram desenvolvidos com o intuito de serem aplicados em instrumentos regulatórios e garantir uma análise simplificados da influência da geometria urbana no ambiente interno. Entretanto, estes métodos apresentam algumas limitações, principalmente, com relação à medida de análise utilizada. Ambos os parâmetros foram definidos considerando o Fator de Luz Diurna, o qual não leva em consideração as componentes direta e refletida da luz, bem como a variabilidade de sol e de céu em um período para uma localidade específica.

O estudo de Chatzipoulka *et al.* (2018), em que as componentes difusa, direta e refletida da luz foram analisadas separadamente, mostrou uma correlação muito alta entre radiação difusa e Fator de Céu Visível. Entretanto, com relação à radiação direta e refletida esse comportamento não aconteceu e apresentou algumas variações dependendo da orientação solar e da localização geográfica. Assim, pode-se antever que quando simulações de iluminação natural passam a considerar a radiação global, o comportamento da luz não possui uma correlação tão alta em relação à visibilidade de céu.

Simulações que consideram a Modelagem de Luz Natural com Base no Clima (*Climate Based Daylight Modelling – CBDM*) representam o comportamento da luz natural de forma mais realista. Essas simulações envolvem em sua base de cálculo a radiação global e, portanto, consideram as componentes difusa, direta e refletida da luz. Analisar o conceito de visibilidade de céu considerando essa forma de análise é fundamental para que se possa ter um entendimento mais detalhado do quanto, principalmente, a componente refletida da luz está contribuindo para a iluminação do ambiente interno. O estudo de Strømman-Andersen e Sattrup (2011) mostrou

que houve um ganho significativo na distribuição da iluminação natural no ambiente interno apenas alterando a refletância das paredes externas de 45% para 75%.

Estudos mais recentes envolvendo geometria urbana e simulações CBDM (NATANIAN; ALEKSANDROWICZ; AUER, 2019; NAULT *et al.*, 2017; ZANDAVALI, 2019; SARATISIS; DOGAN; REINHART, 2016) mostraram que mesmos índices urbanísticos podem resultar em geometrias urbanas e comportamentos luminosos contrastantes entre si. Tanto no estudo de Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019) quanto de Zandavali (2019), os resultados mostraram que para morfologias urbanas do tipo miolo de quadra e arranha céus a variável de altura tem impacto diferente. Na primeira, à medida que se aumenta o índice de aproveitamento, o desempenho lumínico apresenta uma redução abrupta. Já para cenários do tipo arranha céu ou pavilhão, à medida que se aumenta o índice de aproveitamento existe uma redução pouco expressiva no desempenho lumínico, ou seja, os valores obtidos se mantêm quase constantes apesar do aumento da altura. Assim, podemos dizer que a existência de vazios urbanos também possibilita ganhos expressivos de iluminação natural, principalmente em cenários urbanos de maior densidade.

Diferentemente de cidades que foram concebidas com um planejamento urbano bem definido, aquelas que tiveram seus planos diretores construídos ao longo do tempo, conforme a cidade ia se expandindo, apresentam uma geometria urbana com características diversas. A dificuldade de entender a influência da geometria urbana no comportamento luminoso do ambiente interno representa um empecilho para o desenvolvimento de projetos que não possuem o auxílio de simulação computacional na tomada de decisão com relação às estratégias que favorecem o desempenho lumínico. Uma solução para esta lacuna é uma simplificação da geometria urbana para que fosse facilitada a análise do seu impacto com relação à acessibilidade de luz natural. Assim, um parâmetro simplificado possibilita a análise ainda nas fases iniciais de projeto, em que não se tem muitas definições do projeto arquitetônico e conseguir antever impactos causados pelo contexto urbano existente.

Dessa forma, essa pesquisa buscou analisar a influência da geometria urbana no comportamento luminoso do ambiente interno considerando simulações CBDM para diferentes localidades no Brasil. Assim, visa-se contribuir com discussões acerca dos temas levantados nessa revisão: análise do conceito de visibilidade de céu, influência da refletância externa e dos

vazios urbanos no comportamento luminoso do ambiente interno e, por fim, será apresentado um parâmetro que represente uma simplificação da geometria urbana.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Para atingir os objetivos propostos, os procedimentos metodológicos foram divididos em quatro etapas, correspondentes aos tópicos 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. O Quadro 1 apresenta a relação entre os objetivos específicos propostos e os procedimentos metodológicos realizados para atingi-los.

Quadro 1 - Relação entre objetivos específicos e procedimentos metodológicos

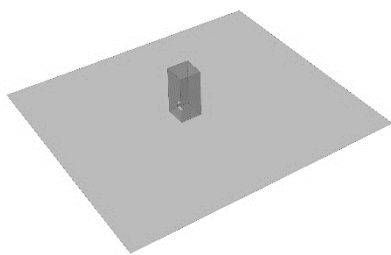
Objetivos Específicos	Procedimentos metodológicos
a) Avaliar o conceito de visibilidade de céu para simulações <i>Climate Based Daylight Modelling</i> (CBDM) com base em pesquisas realizadas anteriormente	3.1 Avaliação do conceito de visibilidade de céu por meio de simulações <i>Climate Based Daylight Modelling</i> (CBDM)
b) Identificar o potencial de incidência de radiação solar no plano vertical de diferentes parcelas de céu com base na orientação solar e base climática local e avaliar sua relação com a disponibilidade de luz natural no ambiente interno	3.2 Análise da radiação solar com base em arquivo climático 3.2.1 Mapeamento da radiação solar incidente no plano vertical na abóboda celeste 3.3 Obstrução de diferentes parcelas do céu 3.3.1 Simulações computacionais de iluminação natural considerando um cenário com obstrução contínua 3.3.2 Simulações computacionais de iluminação natural considerando um cenário com obstruções irregulares 3.3.3 Relação entre resultados de simulação e os valores de radiação solar incidente
c) Verificar o comportamento da componente refletida da luz no meio urbano e a contribuição de vazios urbanos no desempenho luminoso anual do ambiente interno	3.3.4 Análise da componente refletida externa e a influência dos espaços vazios no comportamento luminoso
d) Identificar um parâmetro representativo que caracterize uma simplificação de um cenário urbano com obstruções irregulares	3.4 Definição de um parâmetro representativo para simplificação de um cenário urbano com obstruções irregulares 3.4.1 Procedimento para identificação do parâmetro e definição dos fatores de compensação de diferentes parcelas de céu 3.4.2 Aplicação do procedimento em cenários com obstruções irregulares 3.4.3 Comparação entre resultados de simulação dos cenários com obstrução contínua e com obstruções irregulares

### 3.1 AVALIAÇÃO DO CONCEITO DE VISIBILIDADE DE CÉU POR MEIO DE SIMULAÇÕES *CLIMATE BASED DAYLIGHT MODELLING* (CBDM)

Na primeira etapa deste trabalho foi retomado o conceito de visibilidade de céu por meio do estudo da Janela de Céu Preferível (JCP), desenvolvido por Leder (2007). O objetivo foi usar um conceito que determine, por meio de ângulos, a disponibilidade de luz natural com base no conceito de visibilidade de céu. Assim, foi possível verificar as diferenças resultantes de um céu encoberto para um céu que considera as condições climáticas. A investigação realizada considerou o desenvolvimento de modelos semelhantes aos utilizados por Leder (2007) para a definição da JCP e da sua porção remanescente (Figuras 8 e 9). A modelagem foi realizada de forma paramétrica utilizando os softwares Rhinoceros/Grasshopper (MCNEEL, 2020) e as simulações computacionais *Climate Based Daylight Modelling* (CBDM) utilizando o *plug-in* DIVA (SOLEMMA, 2020).

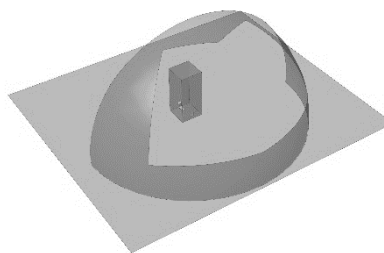
As Figuras 42, 43 e 44 apresentam três condições de cenários utilizados para simulação, respectivamente: i) cenário urbano totalmente desobstruído; ii) cenário em que somente a área caracterizada pela JCP está permitindo a passagem de luz – Céu Preferível; e iii) cenário em que a área remanescente está permitindo a passagem de luz – Céu Remanescente. Os modelos desenvolvidos bem como o piso externo utilizaram um valor de refletância igual a 0,05, com o objetivo de minimizar reflexões externas.

Figura 42 - Céu  
Desobstruído



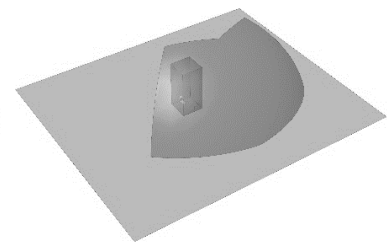
Fonte: Autora (2020)

Figura 43 - Céu Preferível



Fonte: Autora (2020)

Figura 44 - Céu  
Remanescente

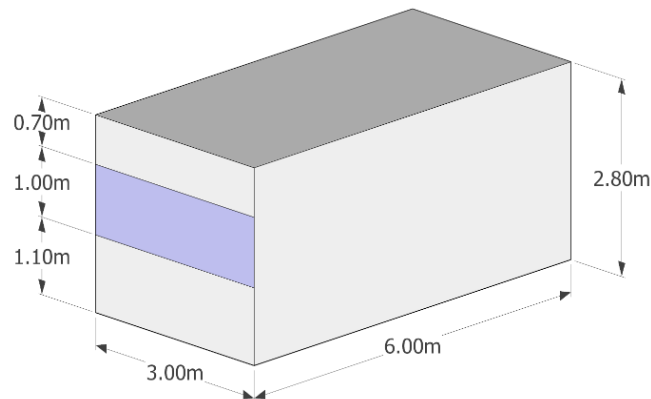


Fonte: Autora (2020)

O ambiente interno (Figura 45) utilizado como referência nessas simulações possui 3 metros de largura por 6 metros de profundidade e uma área de abertura de janela equivalente a

6% da área de piso. O Percentual de Área Fachada (PAF) é de 35% e as dimensões da janela são 3m de largura, 1m de altura, peitoril de 1,10 m e verga de 2,10m.

Figura 45 - Ambiente interno de análise

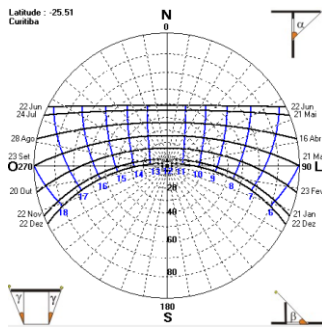


Fonte: Autora (2020)

As simulações serão realizadas para as quatro principais orientações solares (Norte, Sul, Leste e Oeste). Esta escolha se deu em função da JCP original ter utilizado simulações que consideravam um céu encoberto, ou seja, não levava em conta a variabilidade de disponibilidade de luz entre diferentes orientações solares. Ainda, as simulações serão realizadas para três cidades: Curitiba, Brasília e Belém. As localidades foram escolhidas com base em sua grande diferença de latitude, considerando que o Brasil é um país de dimensões continentais e a variação de latitude tem grande influência na incidência solar. As Figuras 46, 47 e 48 mostram as cartas solares de Curitiba, Brasília e Belém, respectivamente, em que se pode entender a trajetória solar de cada uma.

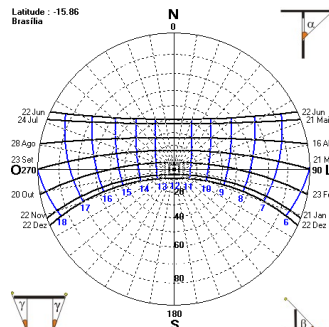


Figura 46 - Carta Solar  
Curitiba



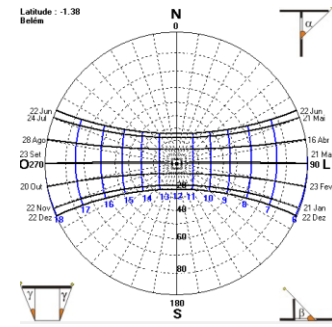
Fonte: Programa Sol-Ar  
LABEE (2020)

Figura 47 - Carta Solar  
Brasília



Fonte: Programa Sol-Ar  
LABEE (2020)

Figura 48 - Carta Solar  
Belém



Fonte: Programa Sol-Ar  
LABEE (2020)

A medida de análise de iluminação natural utilizada foi Autonomia da Luz Natural Espacial (sDA - *Spatial Daylight Autonomy*) e os parâmetros definidos foram 200 lux para 50% das horas de ocupação (sDA<sub>200/50%</sub>). Optou-se pelo uso da medida Autonomia da Luz Natural Espacial (sDA - *Spatial Daylight Autonomy*) visto que esta tem sido amplamente difundida e aplicada nos últimos anos em normas (prEN 17037:2018, LM-83) e certificações (LEEDv4, WELLv2 *Pilot*) a nível mundial e estar em estudo para implementação no contexto brasileiro (ABNT/NBR 15.575-3 – Desempenho Lumínico).

A análise considerou um período de ocupação total de 3650 horas, caracterizando um período anual, e 10 horas de disponibilidade de luz natural. Os arquivos climáticos utilizados para o desenvolvimento do trabalho consideraram, para as três cidades em análise, a base .TMYx 2003-2017. A escolha da base climática se deu em função de possuir os dados de um período mais recente.

No Quadro 2, são apresentados os dados de entrada utilizados nas simulações. O parâmetro *ab* representa o número de inter-reflexões difusas que serão calculadas antes que um raio seja descartado na simulação. Este parâmetro faz uma analogia à quantidade de energia que é possível se refletir em um determinado ambiente. Um valor *ab* de 5 já é suficiente para uma sala padrão sem quaisquer elementos de fachada complexos, como brises. O parâmetro *ad* determina o número de raios que são enviados até um ponto de superfície durante o cálculo. Este número precisa ser alto em função da distribuição de luminância em uma cena com alta variação de brilho. Já o parâmetro *as* determina o número de raios extras que são enviados em

áreas de amostra com um gradiente de alto brilho. O parâmetro *aa* determina a precisão do cálculo de simulação. O parâmetro *ar* determina a densidade máxima dos valores usados na interpolação do cálculo de simulação. A densidade de valor máximo é o tamanho da cena vezes a precisão definida para a simulação (*aa*).

Quadro 2 - Dados de entrada da simulação computacional

<b>Espaçamento da malha</b>	0,5m	<b>Altura do plano de análise</b>	0,75m
<b>Refletância Piso Interno</b>	0,2	<b>aa</b>	0,1
<b>Refletância Parede Interna</b>	0,5	<b>ab</b>	5
<b>Refletância Forro</b>	0,8	<b>ad</b>	512
<b>Transmissão Visível Vidro</b>	0,88	<b>ar</b>	256
<b>Refletância Parede Externa Edifício</b>	0,35	<b>as</b>	128
<b>Refletância Piso Externo</b>	0,05	<b>dr</b>	2
<b>Refletância JCP</b>	0,05	<b>ds</b>	0,2
<b>Arquivos Climáticos</b>	BRA_PR_Curitiba-Pena.Intl.AP.838400_TMYx.2003-2017 BRA_DF_Brasilia-Kubitschek.Intl.AP.833780_TMYx.2003-2017 BRA_PA_Belem-Val.de.Cans.Intl.AP.821930_TMYx.2003-2017		

Fonte: Autora (2020)

Nesta etapa, foi analisado se o ambiente interno possui um comportamento luminoso semelhante nos cenários de céu preferível e desobstruído. Esta análise foi realizada visto que a JCP é caracterizada por ser a parcela de céu que mais contribui para a iluminação natural no ambiente interno. Também foi realizada a análise com o cenário de Céu Remanescente em que o ambiente deveria apresentar quantidades luminosas inferiores ao cenário Céu Preferível para considerar o parâmetro aplicável às simulações *Climate Based Daylight Modelling* (CBDM).

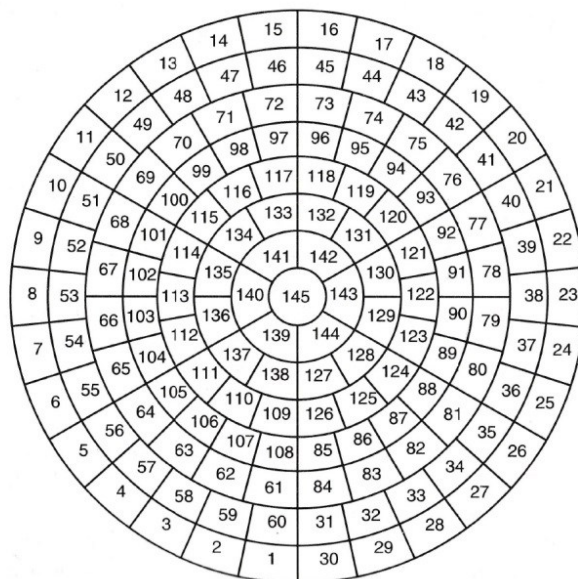
Por fim, com base nos resultados obtidos, foi realizada uma análise para um caso específico, alterando-se o valor do parâmetro *ab* de 5 para 1. Esta modificação foi realizada com o intuito de entender o potencial das interreflexões de gerar aumento na área iluminada do ambiente interno. A utilização do parâmetro *ab* igual a 1 significa gerar um comportamento na simulação em que é considerado apenas a contribuição da componente celeste e direta da luz na base de cálculo.

### 3.2 ANÁLISE DA RADIAÇÃO SOLAR COM BASE EM ARQUIVO CLIMÁTICO

A segunda etapa dessa pesquisa consiste em analisar a incidência da radiação solar ao longo do ano em um plano vertical utilizando os arquivos climáticos das três cidades estudadas na etapa anterior. Esta etapa foi necessária para verificar a variação de disponibilidade de luz nas cidades analisadas com relação à radiação direta e difusa bem como a distribuição das

mesmas na abóboda celeste. A análise foi realizada por meio do *plug-in* Lady Bug acessado por meio do software Rhinoceros/Grasshopper (MCNEEL, 2019). Uma das funções deste *plug-in* permite gerar um domo subdividido em 145 partes, proposto por Tregenza (1987) com o mapeamento da radiação solar. A Figura 49 apresenta a subdivisão utilizada. Dessa forma foi possível analisar a distribuição e a intensidade radiação solar com base em arquivo climático. Esta função foi escolhida como meio para se identificar tanto a distribuição espacial da radiação na abóboda celeste como os valores de intensidade em kWh/m<sup>2</sup> de cada célula. Assim, verificou-se quais as diferenças existentes para as três localidades que estão sendo estudadas considerando a radiação global, radiação difusa e radiação direta. O domo apresenta o valor de radiação solar normal à direção dos raios de cada célula em um determinado ponto. É possível identificar a intensidade de cada célula por meio de uma escala de cores.

Figura 49- Subdivisão da abóboda celeste proposta por Tregenza



Fonte: Tregenza (1987)

O objetivo desta etapa do trabalho foi analisar a intensidade da radiação incidente no plano vertical proveniente de diferentes porções de céu com base nos dados de arquivo climático. Após identificados os valores referentes à incidência de radiação solar normal aos raios foi necessário identificar o ângulo de incidência no plano vertical de cada célula para, então, obter o valor de incidência de radiação normal à fachada. Estes valores foram obtidos

por meio da Equação 8 e 9. A Figura 50 ilustra quais ângulos foram utilizados na fórmula e aplicados a cada célula da subdivisão da abóboda.

$$\beta = \arcsin [\cos \gamma \times \cos |\alpha - \alpha_p|] \quad (8)$$

Onde:

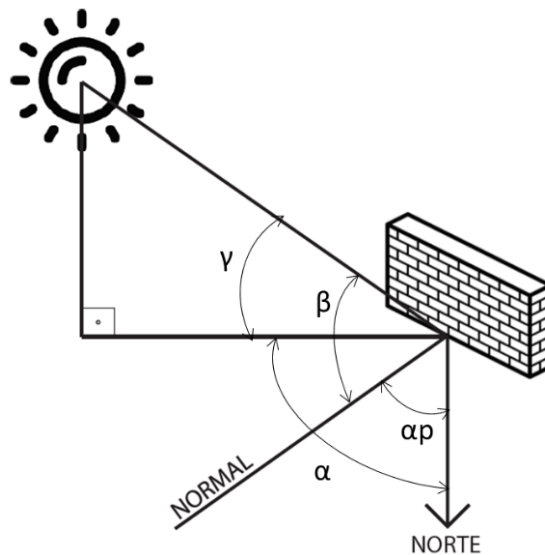
$\beta$  = Ângulo de incidência no plano vertical (°)

$\gamma$  = Altura solar (°)

$\alpha$  = Azimute solar (°)

$\alpha_p$  = Azimute parede (°)

Figura 50 - Desenho ilustrativo dos ângulos utilizados para o cálculo da radiação incidente



Fonte: Autora (2020)

A partir dos resultados obtidos por meio da Equação 8 foi aplicada a equação do efeito redutor do cosseno do ângulo de incidência (Equação 9) para todos os valores de radiação solar normal aos raios de cada célula da abóboda de Tregenza (1987). Assim, foram obtidos novos valores de radiação e foi possível modelar uma nova abóboda celeste, representando por meio de uma escala de cores, a intensidade de radiação solar incidente no plano vertical com base nos dados de arquivo climático para cada orientação solar.

$$x = \cos \beta \times y \quad (9)$$

Onde:

$x$  = Valores de radiação no plano vertical ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )

$y$  = Valores de radiação normais aos raios ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )

$\beta$  = Ângulo de incidência no plano vertical ( $^\circ$ )

Com isso foi possível analisar a contribuição de diferentes parcelas de céu em relação ao total de radiação incidente no plano vertical. Também foi possível verificar as diferenças presentes entre as orientações solares e cidades analisadas.

### 3.3 OBSTRUÇÃO DE DIFERENTES PARCELAS DO CÉU

O objetivo desta etapa do trabalho foi analisar o comportamento luminoso no ambiente interno quando diferentes parcelas de céu estão obstruídas. Para isto, foram realizadas simulações computacionais de iluminação natural para dois diferentes cenários: i) cenários com obstrução contínua (tópico 3.3.1) e ii) cenários com obstruções irregulares (tópico 3.3.2). No primeiro cenário o objetivo foi analisar o comportamento luminoso quando não existem espaços vazios no cenário analisado e a obstrução possui sempre uma mesma altura. No segundo cenário, analisa-se o comportamento luminoso do ambiente interno quando existem espaços vazios entre obstruções e elas possuem diferentes alturas. Para entender de forma mais detalhada o comportamento luminoso, ambos os cenários foram simulados considerando uma refletância externa média e considerando uma minimização do efeito da componente refletida externa. O procedimento de simulação, softwares utilizados e parâmetros adotados foram os mesmos definidos no item 3.1.

Os itens 3.3.1 e 3.3.2 apresentam as características dos cenários simulados e os itens 3.3.3, 3.3.4 e 3.3.5 o tratamento de dados utilizado para atingir os objetivos.

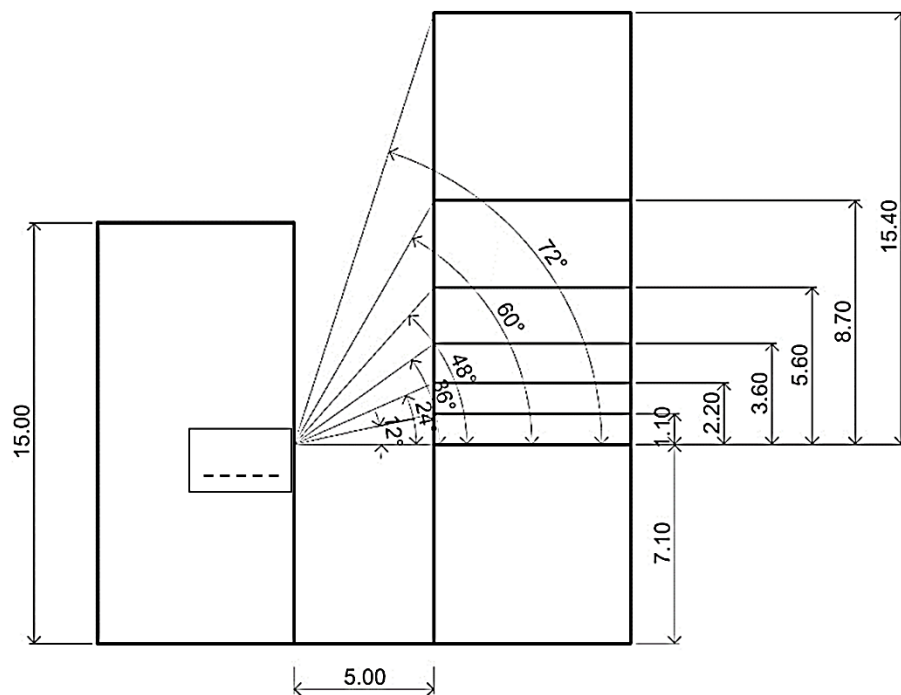
#### **3.3.1 Simulações computacionais de iluminação natural considerando um cenário com obstrução contínua**

Nesta etapa foram realizadas simulações computacionais de iluminação natural considerando uma obstrução contínua que segue os ângulos de altura definidos pela abóboda

de Tregenza (1987). Sendo assim, os ângulos de obstrução vertical definidos foram de  $12^\circ$ ,  $24^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $48^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $72^\circ$ . Ainda, as simulações consideraram cenários com três afastamentos entre a fachada analisada e a obstrução: 5m, 15m e 30m. As Figuras 51, 52 e 53 apresentam em corte os três cenários analisados e as alturas (em metros) das obstruções referentes aos ângulos verticais. O ambiente foi posicionado a 5 metros do chão a fim de minimizar a influência do piso externo em função da principal análise envolver a influência da reflexão externa das superfícies verticais. O ângulo foi medido a partir da altura da verga 7,10 metros. O ambiente foi posicionado em um edifício hipotético de 15 metros de altura.

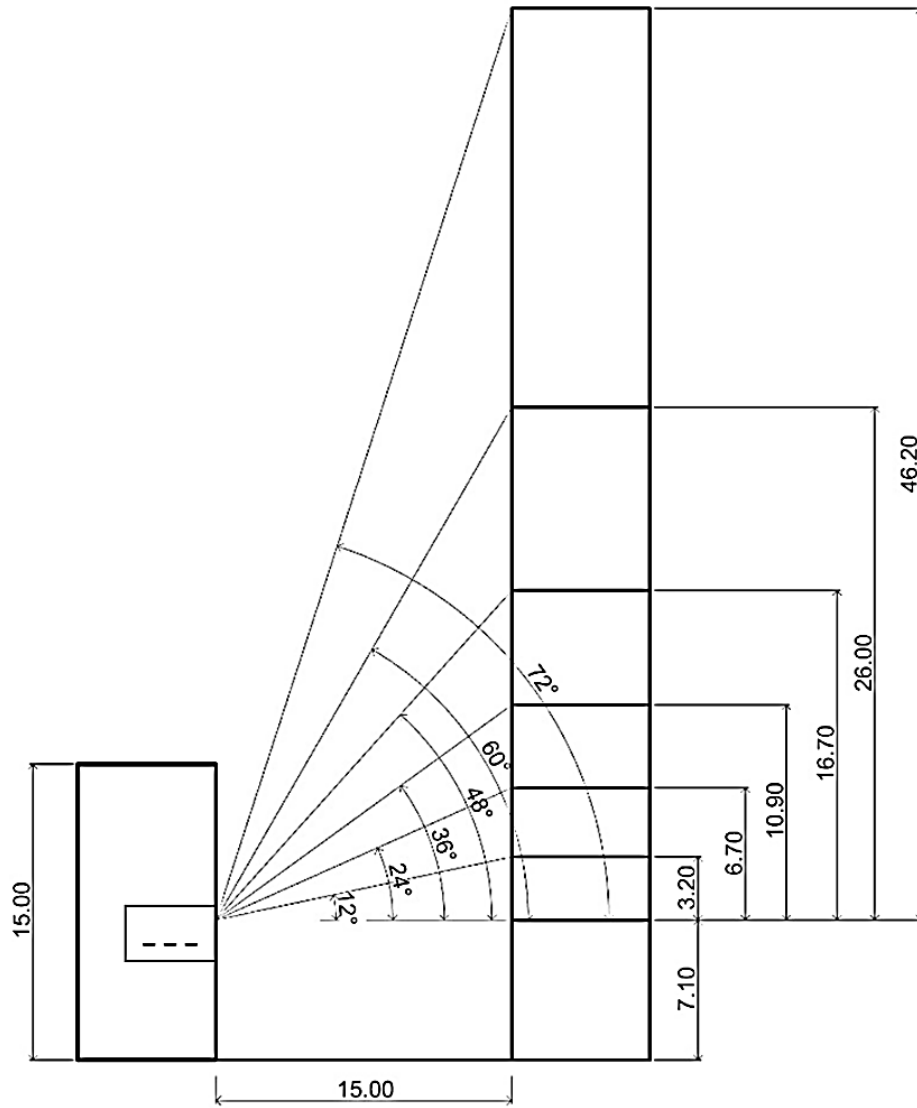
Ao todo, foram geradas 432 simulações. Os tópicos 3.3.3 e 3.3.4 apresentam como serão tratados os dados e quais medidas serão utilizadas para tal.

Figura 51 – Representação em Corte do Cenário de Obstrução Contínua - Afastamento 5m



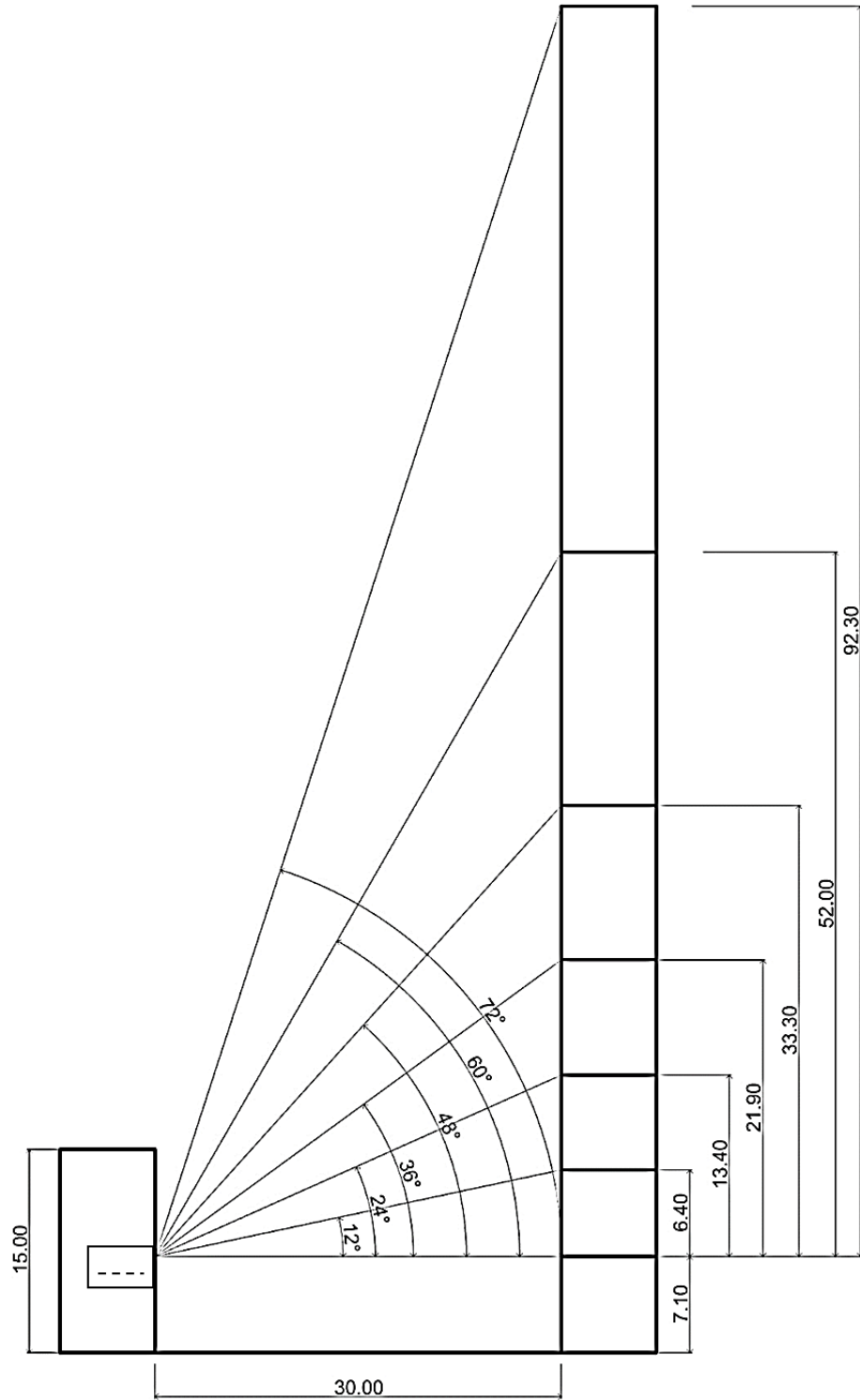
Fonte: Autora (2020)

Figura 52 - Representação em Corte do Cenário de Obstrução Contínua - Afastamento 15m



Fonte: Autora (2020)

Figura 53 - Obstrução Representação em Corte do Cenário de Obstrução Contínua -  
Afastamento 30m



Fonte: Autora (2020)



### **3.3.2 Simulações computacionais de iluminação natural considerando um cenário com obstruções irregulares**

Nesta etapa do trabalho foram realizadas simulações computacionais de iluminação natural que variam as alturas das edificações entre si em um mesmo cenário além de considerar espaços vazios entre as obstruções. Optou-se por não variar os afastamentos laterais entre as edificações de obstrução, buscando manter os ângulos horizontais em todos os cenários. As obstruções variaram suas alturas considerando os ângulos de 24°, 48° e 72°, a fim de entender o comportamento luminoso quando existem obstruções baixas, médias ou altas, respectivamente, e, também, em função destes ângulos terem sido utilizados nas etapas anteriores. Com base nos resultados das etapas anteriores, foi definido que as edificações estariam localizadas dentro de um setor angular horizontal de 120°. Para definir o posicionamento das edificações dentro do cenário de análise o setor foi dividido em três partes iguais (40° cada parte). Os espaços vazios entre as edificações foram definidos com base no ângulo horizontal entre elas, em que 40° horizontais estão desobstruídos na lateral ou frontalmente ao objeto de análise. Foram analisados quatro cenários principais, conforme apresentado nos Quadros 3 e 4.

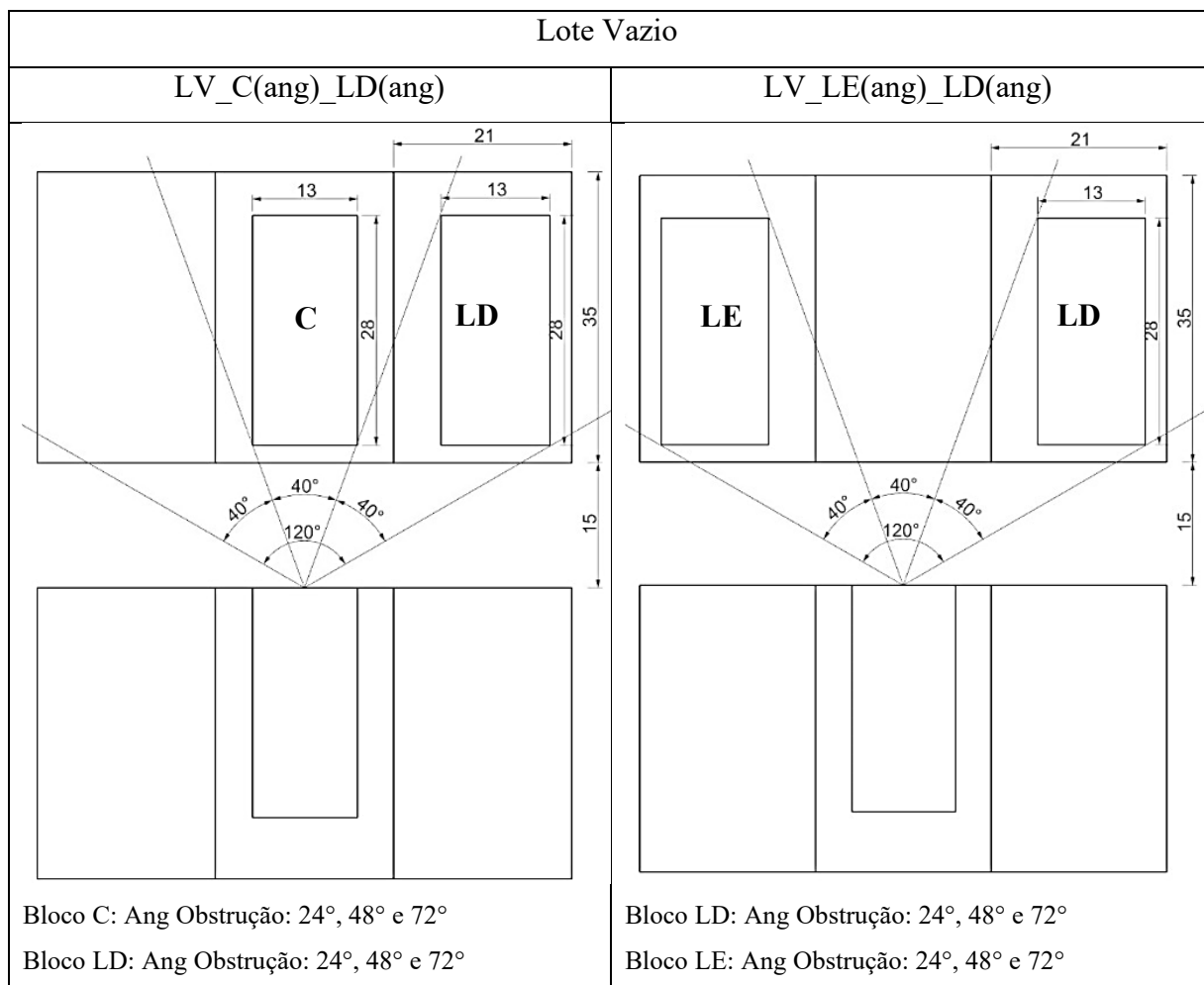
As obstruções foram afastadas 15 metros do objeto de análise em função desta ser uma dimensão de via representativa e comumente encontrada em contextos urbanos. A definição do dimensionamento dos lotes e edificações também teve como base o setor angular de 120°. Logo, o objetivo foi obter 3 edificações em frente ao objeto de análise, as quais apresentam ângulos horizontais de 40° (ver Quadros 3 e 4). Sendo assim, os lotes foram definidos com dimensões 21m x 35m e os edifícios analisados com dimensões iguais a 13m x 28m, o que resultou em uma taxa de ocupação igual a 50%. Destaca-se que não foram considerados lotes de cenários reais, entretanto, buscou-se utilizar dimensões comumente encontradas no parcelamento urbano.

Os Quadros 3 e 4 apresentam os cenários analisados em planta baixa com suas respectivas dimensões em metros e nomenclaturas. A nomenclatura definida coloca como primeiro dado o tipo de cenário analisado (LT - lote vazio ou OB - obstrução baixa) e em seguida a nomenclatura do bloco (C – central, LE – lateral esquerda, LD lateral direita) com o respectivo ângulo de obstrução vertical (24°, 48° ou 72°). Considerando os resultados da etapa

anterior, se optou por analisar a diferença entre a existência de espaços vazios frontalmente e lateralmente ao objeto de análise definiu-se que apenas os blocos centrais e da lateral esquerda apresentariam espaços vazios. Optou-se por não gerar espaços vazios na lateral direita visto que seria gerado um número excessivo de simulações que teriam impacto semelhante ao da lateral esquerda. Entende-se que essa seja uma das limitações do trabalho.

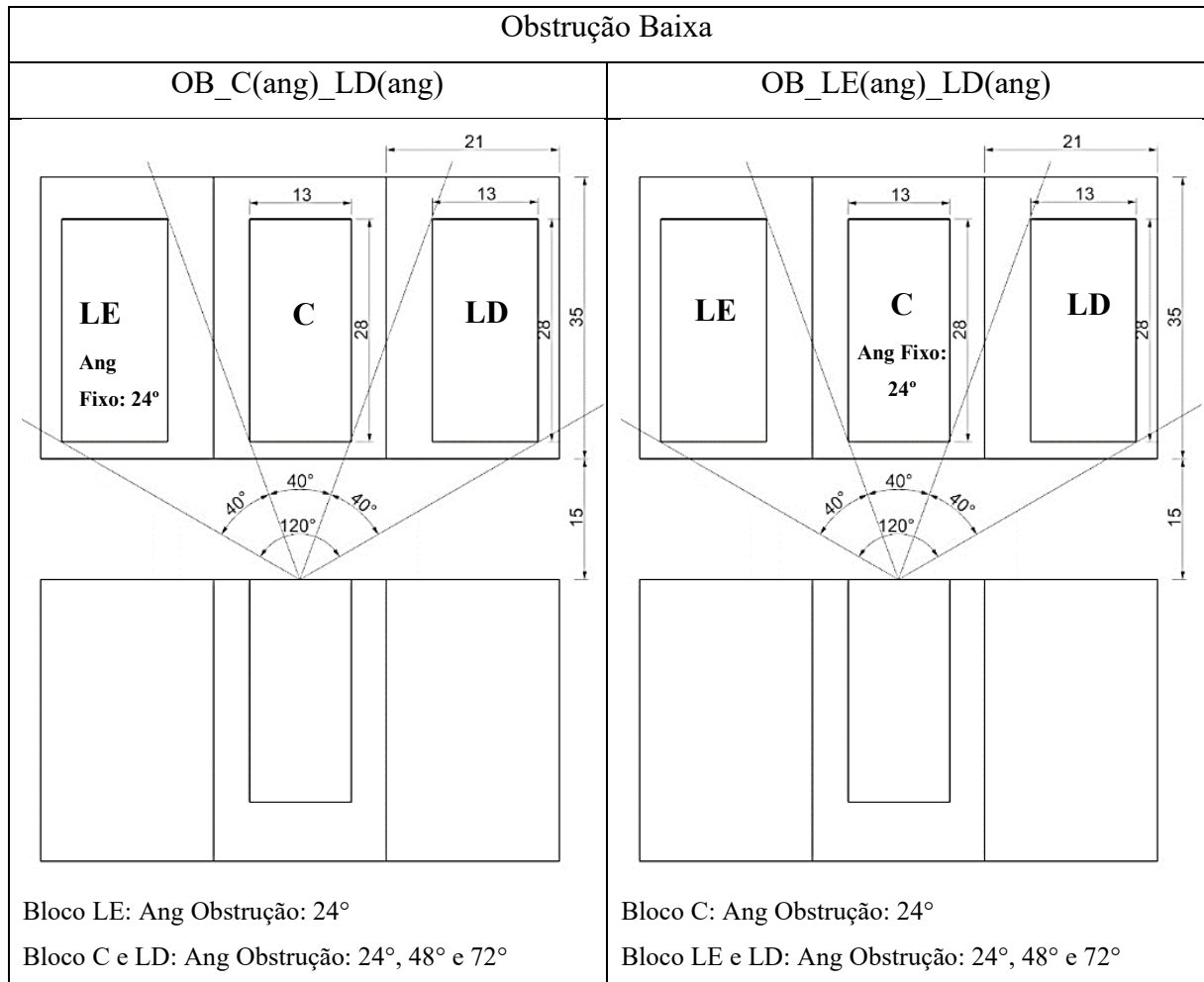
Ao todo, foram geradas 432 simulações: 216 para o cenário com um lote vazio e 216 para o cenário com uma obstrução baixa. Os tópicos 3.3.3 e 3.3.4 apresentam como serão tratados os dados e quais medidas serão utilizadas para tal.

Quadro 3 - Definição dos cenários com obstruções irregulares – Lote Vazio



Fonte: Autora (2020)

Quadro 4 - Definição dos cenários com obstruções irregulares - Obstrução Baixa

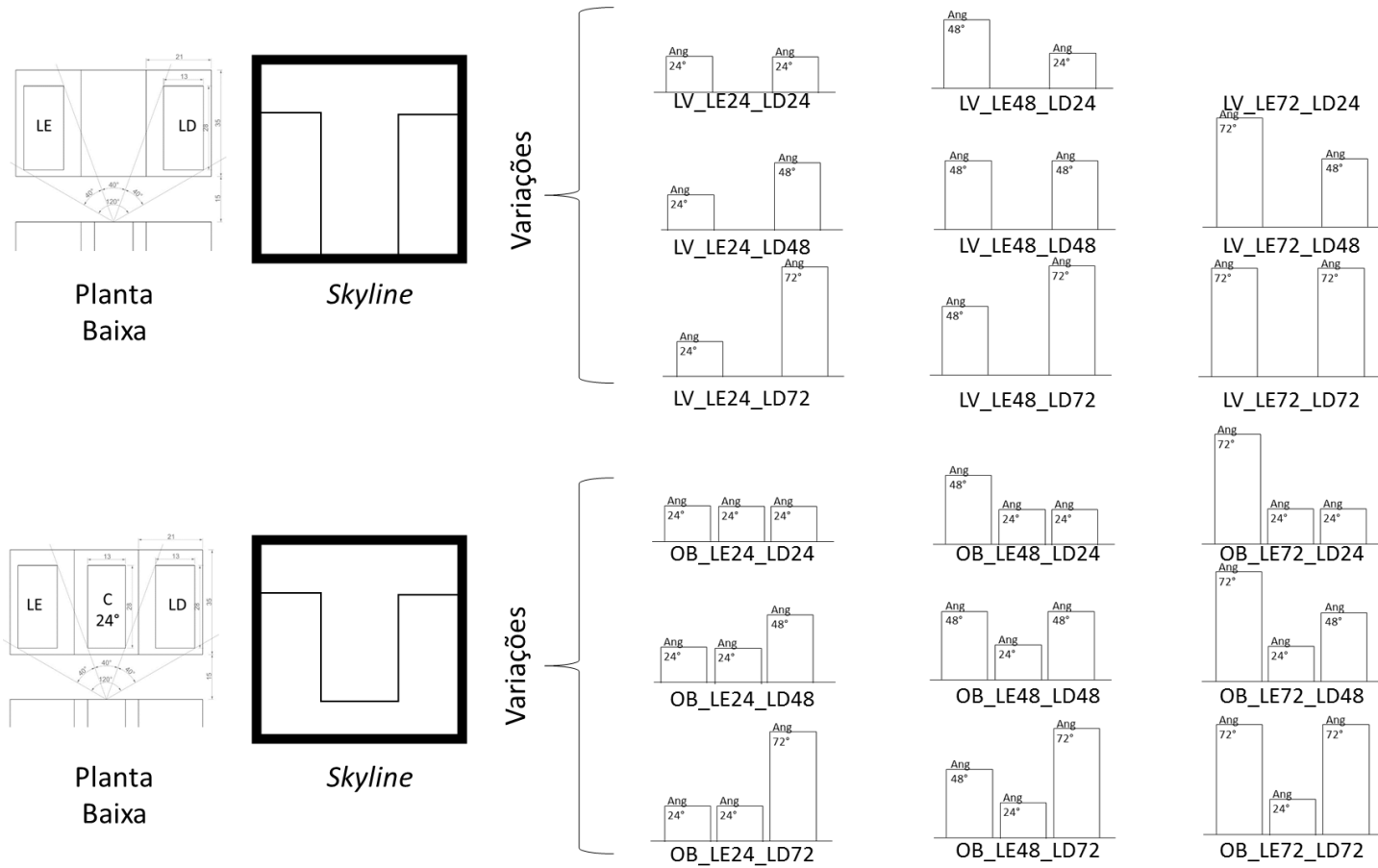


Fonte: Autora (2020)

Para melhor entendimento da configuração final dos cenários as Figuras 54 e 55 apresentam as variações realizadas e a linha do horizonte (*skyline*) de cada tipologia de contexto urbano.

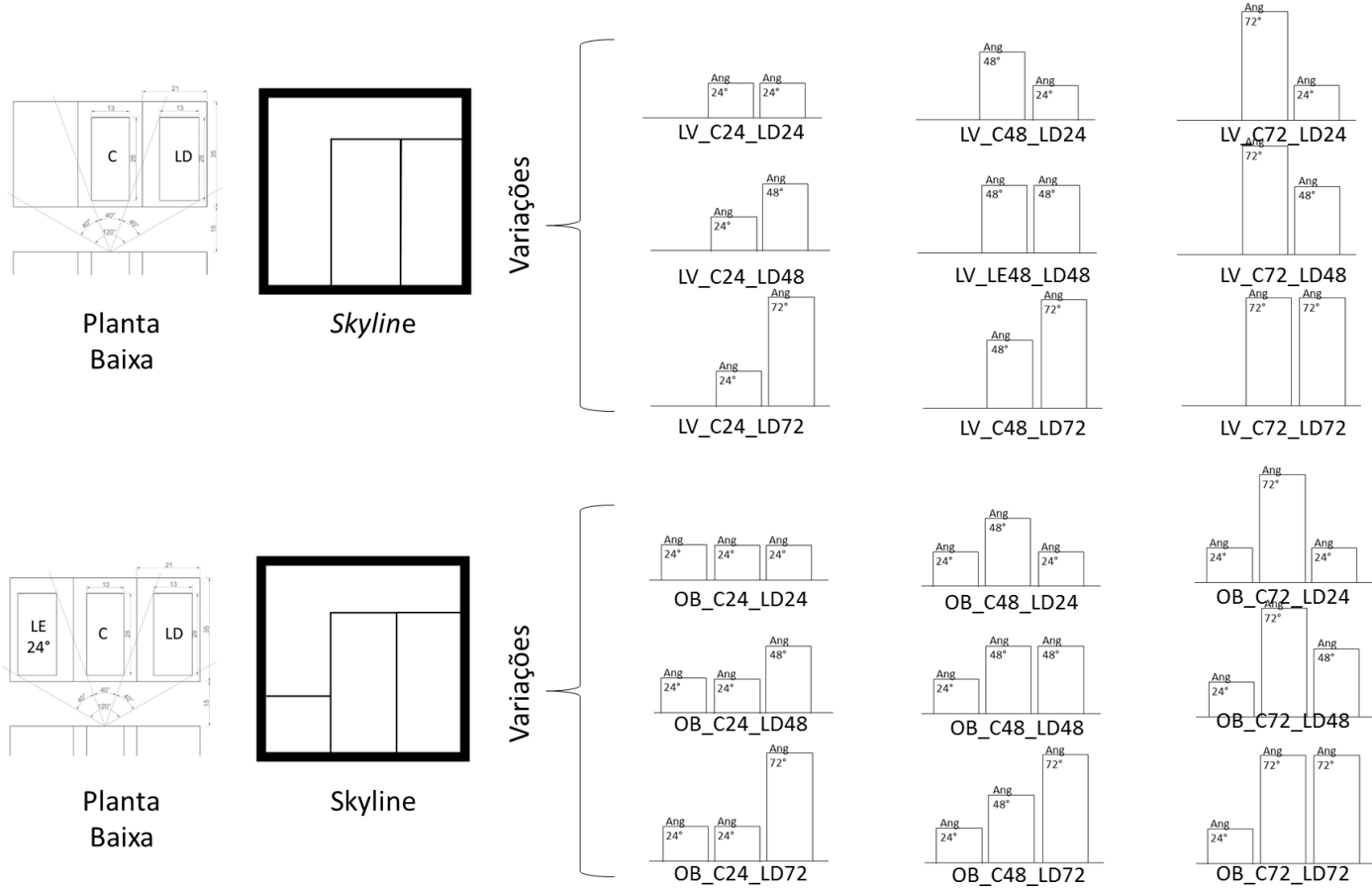


Figura 54 - Cenários Irregulares com Espaços Vazios Frontais



Fonte: Autora (2020)

Figura 55 - Cenários Irregulares com Espaços Vazios Laterais



Fonte: Autora (2020)



### **3.3.3 Relação entre resultados de simulação e os valores de radiação solar incidente na fachada**

Para realizar a análise dos dados nesta etapa foram correlacionados e comparados os dados das simulações de iluminação natural com os dados de radiação gerados no tópico 3.2.1. As medidas de iluminação natural utilizadas para realizar estas análises foram a Autonomia de Luz Natural Espacial, Autonomia de Luz Natural e radiação incidente na janela.

Foram realizadas as análises comparativas para os cenários do tópico 3.3.1 e 3.3.2 separadamente, em função do primeiro caracterizar um cenário mais homogêneo e o outro mais irregular. As análises referentes às simulações definidas no tópico 3.3.1 apresentaram uma comparação entre simulações que consideraram uma refletância média em comparação aquelas que consideraram uma minimização do efeito da componente refletida externa (CRE). Ainda, foram realizadas análises comparativas entre os cenários identificando o quanto da radiação recebida pela janela é proveniente somente do céu e do sol e o quanto é referente é CRE.

Para realizar as análises referentes as simulações desenvolvidas no tópico 3.3.2 foram selecionados casos representativos que apresentaram um comportamento que não mantiveram o mesmo padrão em relação a cenários com geometria semelhante. As análises foram realizadas por meio dos mapas de Autonomia de Luz Natural na altura do plano de trabalho e por meio da sobreposição da máscara de obstrução nas abóbodas que mostram a distribuição da radiação incidente geradas no tópico 3.2.1.

### **3.3.4 Análise da componente refletida externa e a influência dos espaços vazios no comportamento luminoso**

Para analisar a influência da refletância no comportamento luminoso foram geradas simulações que variaram os valores do parâmetro  $ab$  (*ambient bounces* - interreflexões) e da refletância de superfície externa vertical. Como dado de entrada, para as simulações que consideraram a componente refletida externa foi considerado uma refletância média igual a 0,35 e o parâmetro  $ab$  igual a 5. Para as simulações que consideraram a minimização do efeito da componente refletida externa foi considerada uma refletância de 0,05, visto que o *software* considera apenas a componente direta quando o valor é igual a 0. O parâmetro  $ab$  igual a 1 está contabilizando também a componente difusa da luz proveniente apenas do céus e gera a minimização das interreflexões no cenário de análise. Considerando que o parâmetro  $ab$  é o



responsável pelo cálculo da quantidade de interreflexões difusas no ambiente de análise, esta variação buscou gerar uma análise o mais próximo da realidade considerando o fenômeno físico, em que o parâmetro  $ab$  igual a 1 estaria representando somente a quantidade de radiação proveniente das componentes direta e celeste da luz. A pesquisa não está buscando avaliar a sensibilidade do software, mas sim utilizar parâmetros de simulação que permitam desmembrar o comportamento da luz para um melhor entendimento do fenômeno físico.

No tópico 3.3.1, a variação de afastamentos teve como objetivo identificar o quanto a iluminação natural no ambiente interno é influenciada pela componente refletida da superfície externa conforme a altura da obstrução aumenta, mesmo mantendo o ângulo de obstrução vertical. No tópico 3.3.2, buscou-se entender o potencial de reflexão das superfícies externas e analisar o potencial de incidência de radiação incidente paralela à janela de aumentar o desempenho lumínico no interior do ambiente. Foram realizadas análises comparativas entre os cenários que estavam desobstruídos frontalmente e lateralmente, buscando identificar o potencial de variação nos valores de iluminação do ambiente interno. Posteriormente foram realizadas análises comparativas entre o cenário desobstruído lateralmente e aquele com uma obstrução baixa lateral bem como entre o cenário desobstruído frontalmente e aquele que possui uma obstrução baixa frontal.

As análises foram realizadas por meio de gráficos comparativos utilizando a medida de Autonomia de Luz Natural Espacial. Esta medida foi escolhida para realizar as análises em função de facilitar o entendimento do percentual de área do ambiente que atinge o valor de 200 lux em 50% das horas de disponibilidade de sol. Além disso, essa tem sido a medida mais utilizada recentemente por normas (prEN 17037:2018 – *Daylight in buildings*) e certificações (LEED v4, WELL v2 *Pilot*) da área. Também foram realizadas análises utilizando os mapas de distribuição de Autonomia de Luz Natural na altura do plano de trabalho (0,75m), com o objetivo de entender a distribuição da luz no tempo e no espaço.

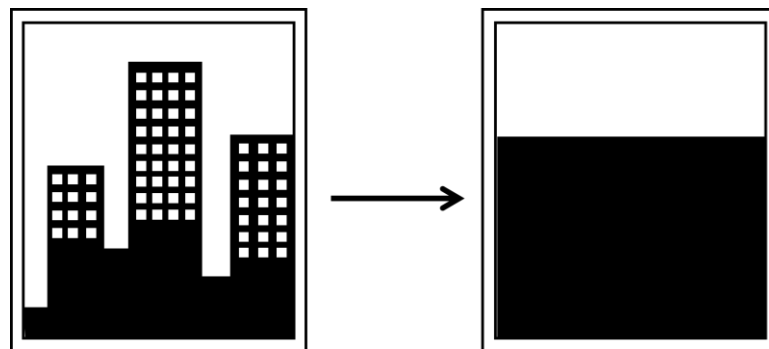
#### 3.4 DEFINIÇÃO DE UM PARÂMETRO REPRESENTATIVO PARA SIMPLIFICAÇÃO DE UM CENÁRIO URBANO COM OBSTRUÇÕES IRREGULARES

Nesta etapa do trabalho buscou-se encontrar um parâmetro representativo que pudesse caracterizar o comportamento luminoso de diversas obstruções com características irregulares.

Para a definição do parâmetro optou-se por utilizar variáveis que fossem de fácil identificação por meio de ferramentas de geoprocessamento ou de desenho arquitetônico em fases iniciais de projeto. O desenvolvimento deste parâmetro tem em vista evitar o uso de simulação computacional nas fases iniciais de projeto e antecipar decisões projetuais com relação à redução da disponibilidade de luz natural causada pela geometria urbana.

Este parâmetro buscou identificar um único ângulo de obstrução vertical representativo que caracterize a influência de mais de uma obstrução externa com diferentes características no comportamento luminoso do ambiente interno. A Figura 56 ilustra a proposta do desenvolvimento deste parâmetro, em que se buscou gerar uma simplificação, por meio de uma obstrução contínua, para um cenário urbano com obstruções de características irregulares.

Figura 56 - Ilustração da proposta de simplificação da geometria urbana



Fonte: Autora (2020)

O tópico 3.4.1 apresenta o procedimento utilizado para identificar o ângulo de obstrução vertical representativo e o tópico 3.4.2 apresenta como será realizada a aplicação do procedimento em cenários irregulares. Por fim, o tópico 3.4.3 apresenta uma comparação entre os resultados de simulação computacional de iluminação natural.

### **3.4.1 Procedimento para identificação do parâmetro e definição dos fatores de compensação de diferentes parcelas de céu**

Em um contexto urbano, muitas vezes as obstruções externas se apresentam com diferentes características (alturas, refletâncias e espaçamento entre si), e estas variações possuem impacto significativo no comportamento luminoso do ambiente interno. Em cenários com múltiplas obstruções, se observa que aquelas que estão localizadas lateralmente à janela do ambiente de análise possuem uma influência significativamente inferior no desempenho

lumínico em relação as que se localizam frontalmente. Sendo assim, este procedimento busca avaliar quantitativamente o quanto essa redução representa. Assim, serão utilizados como variáveis os ângulos verticais e horizontais de obstrução dentro de um setor angular horizontal definido por meio dos resultados das etapas anteriores.

Para identificar o parâmetro proposto deverá ser realizado um procedimento em três etapas, descritas pelos tópicos 3.4.1.1, 3.4.1.2 e 3.4.1.3.

#### 3.4.1.1 Definição dos ângulos verticais e horizontais

O primeiro passo para a realização do procedimento foi definir os ângulos horizontais e verticais de cada edificação. Os ângulos horizontais podem ser identificados em planta baixa. Para definir o ângulo de obstrução vertical para cada obstrução existente no entorno, pode-se verificar o ângulo em corte ou aplicar a Equação 10, utilizando dimensões disponíveis em planta baixa ou por meio de dados de geoprocessamento (ver Figura 57):

$$\tan \theta = \frac{h-hj}{d} \quad (10)$$

Onde:

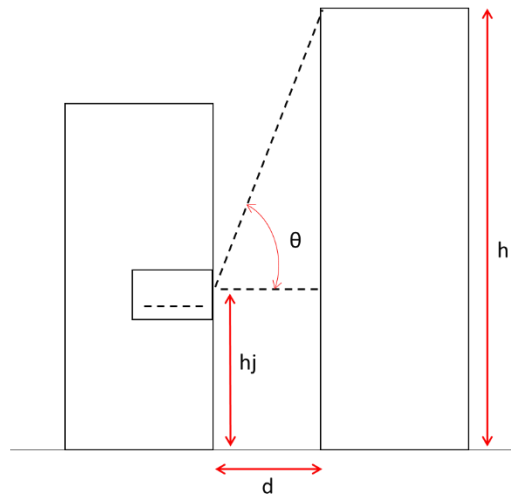
$\theta$  = Ângulo de obstrução vertical

h = Altura da obstrução

hj = Altura do piso térreo do edifício em análise até a verga da janela

d = Distância da obstrução em relação ao objeto de análise

Figura 57 - Determinação do Ângulo de Obstrução Vertical



Fonte: Autora (2020)

#### 3.4.1.2 Posicionamento das edificações e definição dos fatores de compensação

Com base nas etapas anteriores, pode-se identificar que as parcelas de céu possuem diferentes potenciais de incidência e, portanto, possuem diferentes contribuições para a iluminação natural no ambiente interno. Assim, foi proposta uma setorização da abóboda celeste em 9 partes. O objetivo desta setorização foi verificar, de forma quantitativa, a diferença de radiação entre diferentes parcelas do céu.

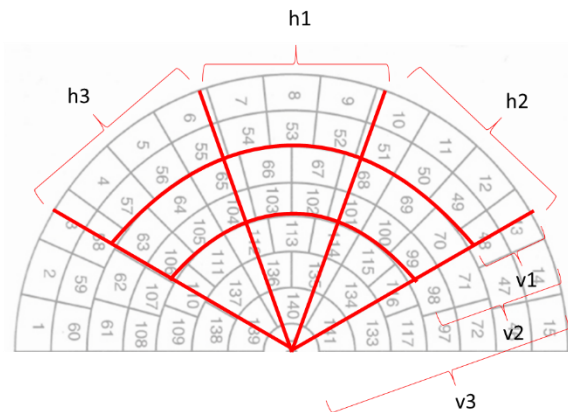
Primeiramente foi definido um setor angular horizontal que possui maior potencial de incidência de radiação no plano vertical. Definido este ângulo, dividiu-se a abóboda celeste proposta por Tregenza em 3 setores horizontais e 3 setores verticais e a combinação entre eles resultou em 9 setores cada um com um valor que caracteriza o fator de compensação. Os setores horizontais foram divididos em três partes iguais ( $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$ ), caracterizando duas parcelas laterais (direita e esquerda) e uma frontal. Após definidos os setores azimutais, foram definidos três setores de altitude, representando o potencial de obstrução quando existem obstruções mais baixas ( $0^\circ - 24^\circ$  de obstrução vertical), medianas ( $25^\circ - 48^\circ$  de obstrução vertical) e altas ( $49^\circ - 80^\circ$  de obstrução vertical). As Figuras 58 a 61 apresentam a setorização para meia abóboda demarcadas pela linha pontilhada vermelha para as fachadas Norte, Sul, Leste e Oeste, respectivamente.

Para se obter estes valores, foi realizada a soma de todas as células de cada setor, sendo que para os setores verticais os valores contabilizados são sempre somados ao setor abaixo. A

radiação contabilizada para o setor v2 é a soma das células do setor v1 e v2 de cada setor horizontal e a radiação contabilizada para o setor v3 é a soma dos valores das células do setor v1, v2 e v3, para cada setor horizontal. A análise dos setores verticais foi realizada desta forma visto que uma obstrução externa nunca estaria bloqueando apenas a parcela referente ao setor superior, mas também aquela que está abaixo também.

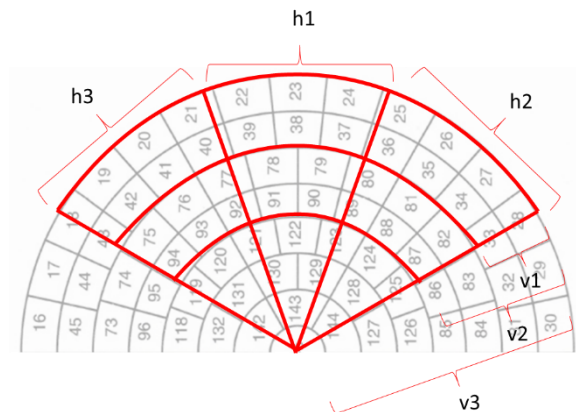
Após verificado o total de radiação referente a cada setor foi então definido o setor central como referência e, então, verificado o quanto cada setor lateral representa em relação ao setor central em termos percentuais. Estes valores foram definidos como fatores de compensação.

Figura 58 - Setorização das células para Fachada Norte



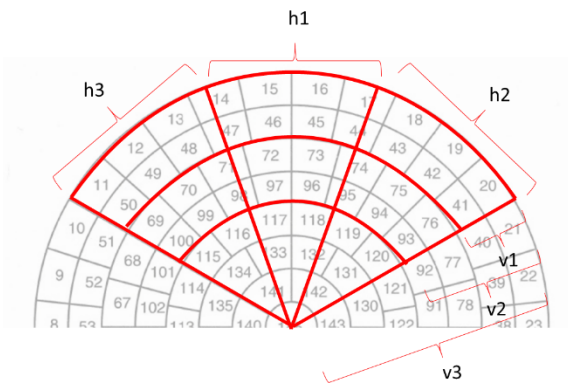
Fonte: Adaptado de Treguenza (1987)

Figura 59 - Setorização das células para Fachada Sul



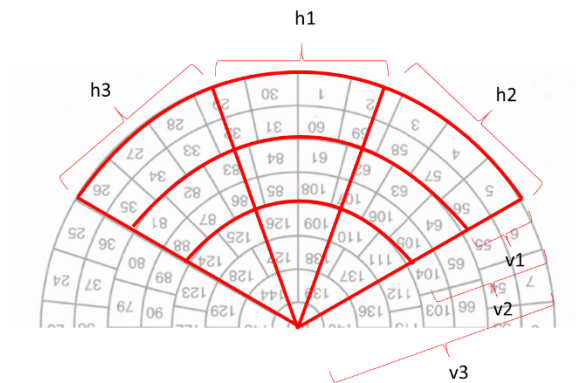
Fonte: Adaptado de Treguenza (1987)

Figura 60 - Setorização das células para Fachada Leste



Fonte: Adaptado de Treguenza (1987)

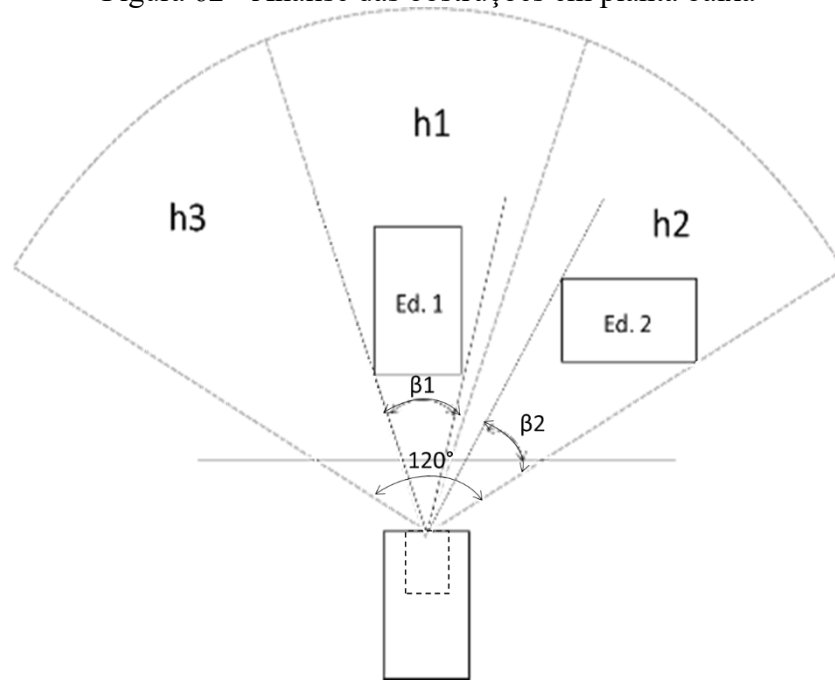
Figura 61 - Setorização das células para Fachada Oeste



Fonte: Adaptado de Treguenza (1987)

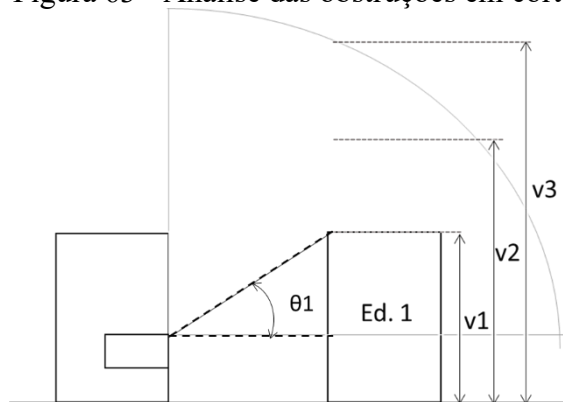
Com os fatores de compensação definidos, a segunda etapa do procedimento consiste em verificar o posicionamento de cada obstrução considerando os ângulos horizontais e verticais definidos. As Figuras 62, 63 e 64 ilustram de que forma as obstruções devem ser analisadas em planta baixa e em corte. Primeiramente, verifica-se em planta baixa em qual setor horizontal a obstrução se encontra. Em seguida, verifica-se o ângulo de obstrução vertical da mesma para identificar em qual setor vertical ela se encontra (v1, v2 ou v3). Com isso, é possível identificar a combinação de setores em que a obstrução se enquadra e verificar o fator de compensação correspondente que deverá ser aplicado na equação do ângulo representativo (Equação 11).

Figura 62 - Análise das obstruções em planta baixa



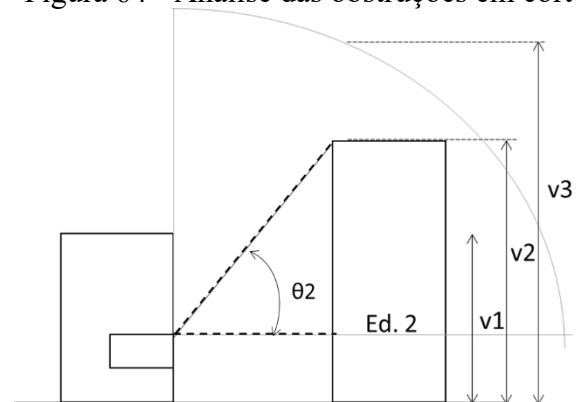
Fonte: Autora (2020)

Figura 63 - Análise das obstruções em corte



Fonte: Autora (2020)

Figura 64 - Análise das obstruções em corte



Fonte: Autora (2020)

#### 3.4.1.3 Definição da fórmula do ângulo de obstrução vertical representativo

A partir dos ângulos horizontais e verticais verificados para cada obstrução, bem como a definição do fator que deve ser aplicado para cada obstrução, deve-se utilizar a Equação 11 para se obter o ângulo de obstrução representativo:

$$\theta_r = fr \times \frac{\sum_1^n (\theta_n \times \beta_n \times fc)}{120} \quad (11)$$

Onde:

$\theta_r$  = Ângulo de obstrução vertical representativo

$\theta_n$  = Ângulo de obstrução vertical de cada obstrução

$\beta_n$  = Ângulo de obstrução horizontal

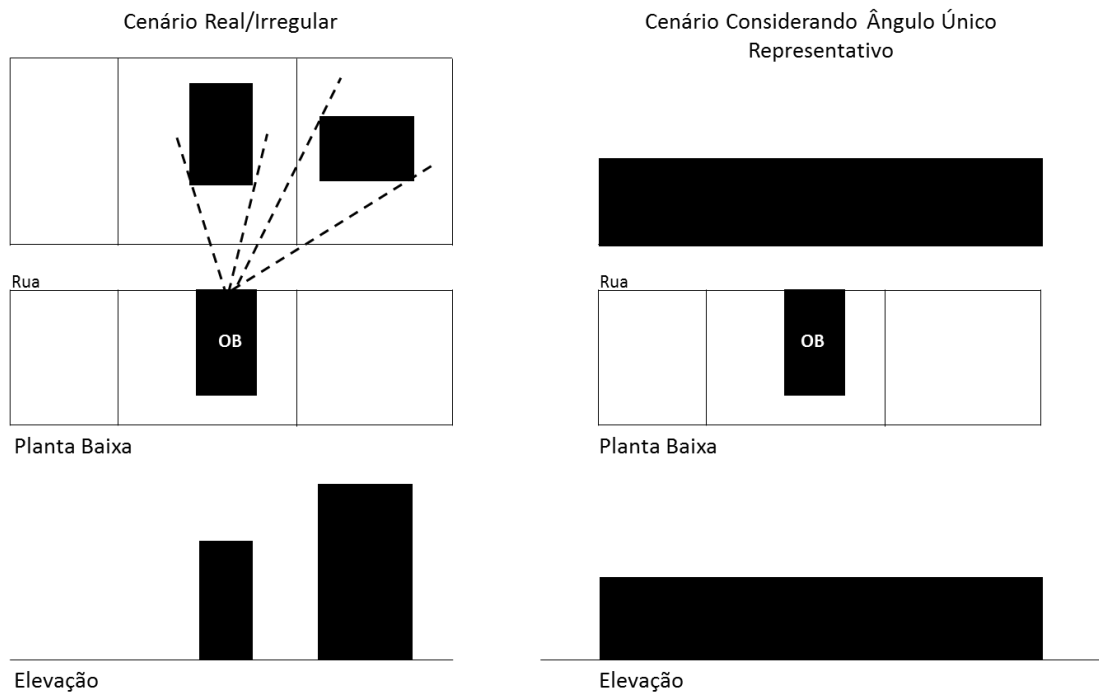
$fc$  = Fator de compensação

$fr$  = Fator de redução referente à componente refletida externa

A fórmula representa basicamente uma média dos ângulos verticais de obstrução ponderada pelos ângulos horizontais. A Figura 65 ilustra a proposta, em que a esquerda é apresentado o cenário real ou irregular e a direita a proposta de uma obstrução contínua que caracterize esse cenário por meio de um ângulo vertical representativo único com obstrução equivalente à anterior. Por meio dos fatores de compensação é possível reduzir ou majorar os ângulos de obstruções verticais que possuem maior ou menor influência na disponibilidade de luz natural dependendo da sua posição no espaço, orientação solar e localidade em que está inserido.



Figura 65 – Equivalência entre Cenário Real/Irregular X Cenário Simplificado - Ângulo de Obstrução Vertical Representativo



Fonte: Autora (2021)

### 3.4.2 Aplicação do procedimento em cenários com obstruções irregulares

A aplicação deste procedimento foi realizada para os cenários do tópico 3.3.2. Com o ângulo representativo definido para cada um dos cenários, foram geradas simulações de iluminação natural *Climate Based Daylight Modelling*. Utilizou-se o mesmo ambiente interno citado no item 3.1 (Figura 43) e parâmetros descritos no Quadro 1 do item 3.1. Foi modelada uma obstrução contínua, como no tópico 3.3.1, com o ângulo de obstrução vertical representativo de cada cenário.

### 3.5 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS

Nesta etapa foi realizada a comparação entre os resultados das simulações obtidos para os cenários urbanos irregulares, definidos no tópico 3.3.2, em relação aos cenários de obstrução contínua, definidos no tópico 3.3.1, que possuem comportamento semelhante. Para que essa análise fosse mais consistente, verificou-se não só o resultado de Autonomia de Luz Natural

Espacial ( $sDA_{200/50\%}$ ) como também os valores de Autonomia de Luz Natural ( $DA_{200}$ ) ao longo do eixo central da malha de cálculo no sentido de sua profundidade.

Por fim, foi realizada a comparação entre o ângulo vertical obtido por meio do cálculo do procedimento proposto no tópico 3.4 e verificado se foi possível obter valores próximos ao comportamento semelhante analisado por meio da obstrução contínua. Entende-se que se este valor estivesse dentro da faixa proposta pelos setores v1, v2 ou v3, o valor obtido por meio de cálculo está representando de forma adequada o comportamento luminoso de um cenário urbano com obstruções irregulares. O objetivo desta análise foi verificar se foi possível encontrar um ângulo representativo que de fato caracterize um comportamento equivalente de uma obstrução contínua em relação à um cenário com obstruções de características variadas.

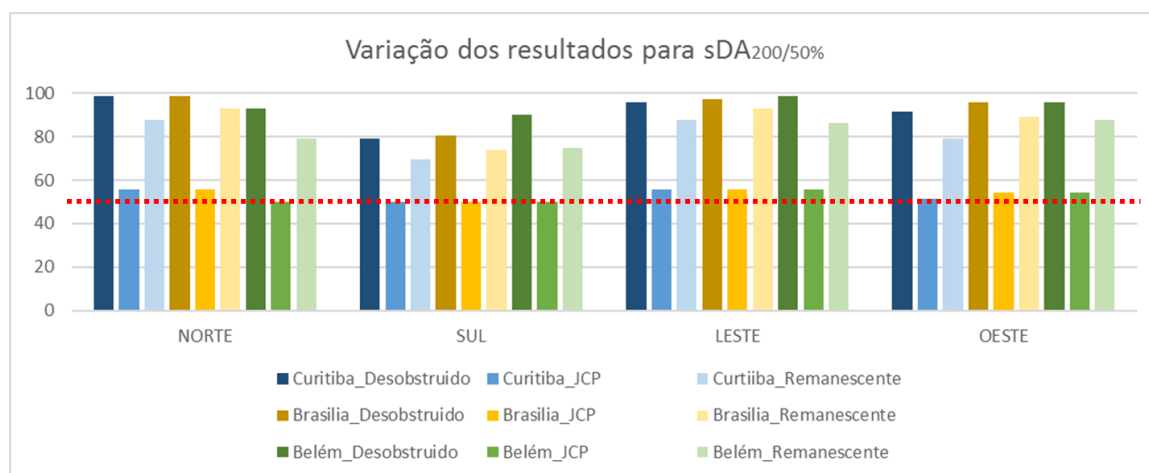
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos acerca da pesquisa proposta. No tópico 4.1 são apresentados os resultados referentes ao objetivo específico (a): avaliar o conceito de visibilidade de céu para simulações *Climate Based Daylight Modelling* (CBDM) com base em proposições de pesquisas realizadas anteriormente. No tópico 4.2 são apresentados os resultados referentes ao objetivo (b): identificar o potencial de incidência de radiação solar no plano vertical de diferentes parcelas de céu com base na orientação solar e base climática local e avaliar sua relação com a disponibilidade de luz natural no ambiente interno. No tópico 4.3 são apresentados os resultados referentes ao objetivo específico (c): verificar o comportamento da componente refletida da luz no meio urbano e a contribuição de vazios urbanos no desempenho luminoso anual do ambiente interno. Por fim, no tópico 4.4 são apresentados os resultados referentes ao objetivo específico (d): identificar um parâmetro representativo que caracterize uma simplificação de um cenário urbano com obstruções irregulares.

#### 4.1 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO CONCEITO DE VISIBILIDADE DE CÉU POR MEIO DE SIMULAÇÕES *CLIMATE BASED DAYLIGHT MODELLING* (CBDM)

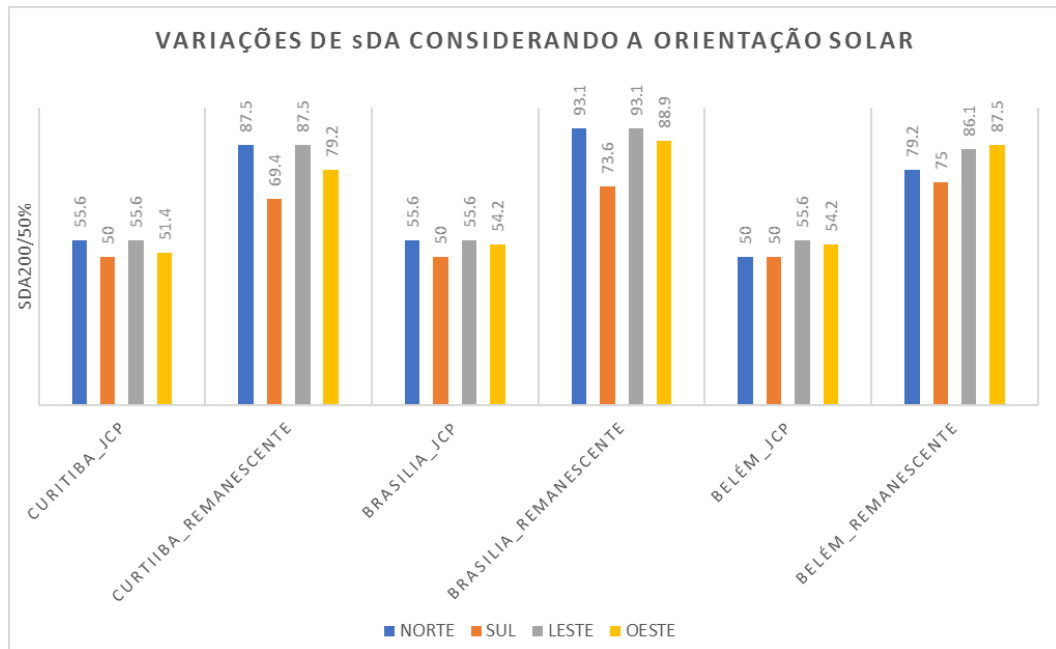
Os resultados para as simulações *Climate Based Daylight Modelling* mostraram divergências em relação à proposta original do parâmetro Janela de Céu Preferível. Este resultado era esperado em função das simulações envolverem em seu cálculo, além da componente difusa, a contabilização das componentes direta e refletida externa e interna da luz. O primeiro aspecto verificado foi o fato de que em todos os casos simulados a parcela remanescente da JCP contribuiu mais para iluminação natural em relação à área definida pela JCP. A Figura 66 apresenta a variação dos valores de  $sDA_{200/50\%}$  para todos os cenários analisados.

Figura 66 - Comparação entre Resultados de  $sDA_{200/50\%}$



Fonte: Autora (2020)

A linha pontilhada em vermelho marca o valor de 50% para  $sDA_{200/50\%}$ . Pode-se perceber que a contribuição de iluminação natural caracterizada pela JCP apresenta valores muito próximos para todas as localidades e todas as orientações solares. A diferença de  $sDA$  entre as quatro orientações solares é de 5,6% de variação entre o cenário com maior e menor disponibilidade de luz natural em todas as localidades simuladas. Já para a parcela remanescente essa variação é maior, resultando em uma diferença 18,1% entre o cenário com maior e menor disponibilidade de luz natural para Curitiba, 19,5% para Brasília e 12,5% para Belém (ver Figura 67).



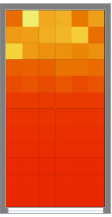
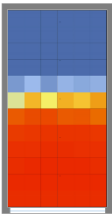
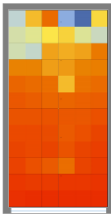
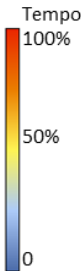
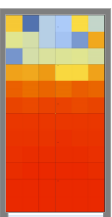
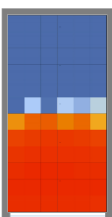
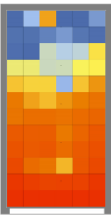
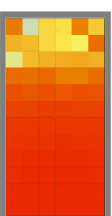
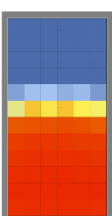
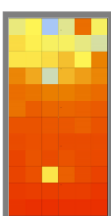
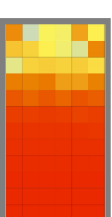
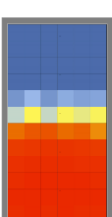
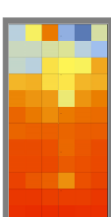
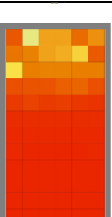
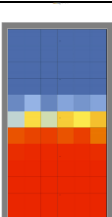
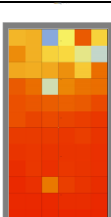
Figura 67 - Comparação entre Resultados de sDA<sub>200/50%</sub> considerando a Orientação Solar

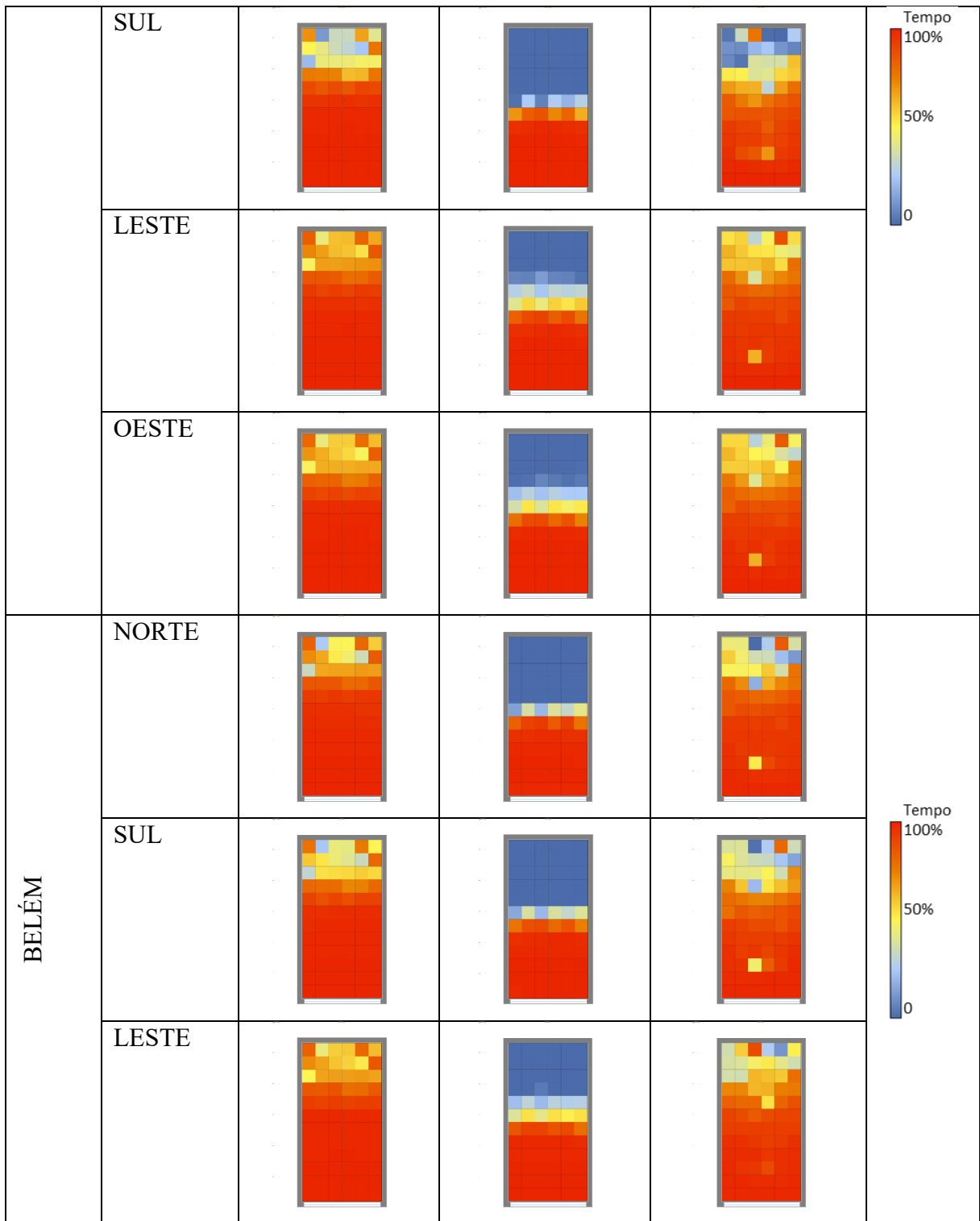
Fonte: Autora (2020)

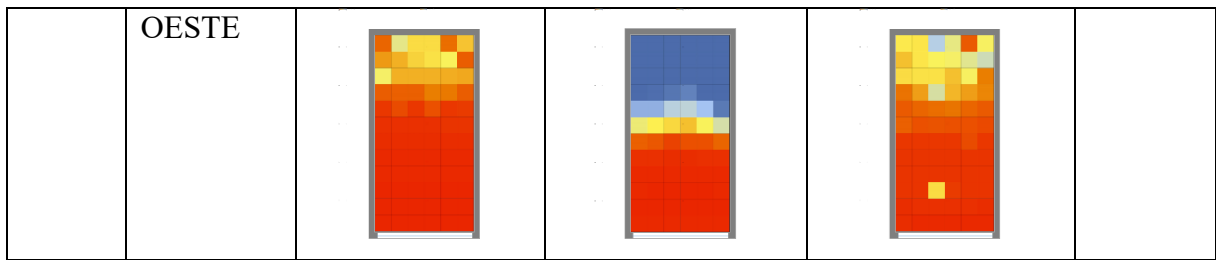
Pode-se perceber que a JCP está bloqueando a visão de direções que tem importância significativa na iluminação natural dos ambientes internos. A parcela remanescente permite que existam mais interreflexões internas visto que a radiação incidente lateralmente atinge primeiramente as paredes e não o plano de trabalho. Logo, existe a possibilidade de que ocorram mais reflexões internas ao contrário do que acontece no cenário representado pela JCP, onde a maior parte parcela incidente chega diretamente no plano de trabalho. É possível observar nos Mapas de Distribuição de Autonomia de Luz Natural (Quadro 6) que para todos os casos do cenário com o céu definido pela JCP os mapas ficam bem definidos por meio das cores falsas, sem uma gradação de cores. Isto indica que as células da malha de cálculo atingem ou 100% ou 0% de Autonomia de Luz Natural. Este comportamento mostra que a energia distribuída no ambiente através das reflexões é pequena. A radiação direta incide diretamente no plano de cálculo e não atinge outras superfícies para que possa ser distribuída de forma difusa no ambiente. Já nos cenários de céu remanescente pode-se perceber o contrário. Os mapas mostram a intensidade das células da malha distribuídas de forma irregular no plano de trabalho. Este comportamento representa o inverso do caso anterior. A energia distribuída no ambiente através das reflexões entre as superfícies gera quantidades luminosas significativas que resultam em

uma área iluminada maior do que os ângulos definidos como área de visibilidade de céu preferível.

Quadro 5 - Mapas de Distribuição de Autonomia de Luz Natural

Cidade	Orientação Solar	Céu Desobstruído	Céu JCP 	Céu Remanescente 	Legenda
CURITIBA	NORTE				 <p>Tempo 100% 50% 0</p>
	SUL				
	LESTE				
	OESTE				
BRASILIA	NORTE				





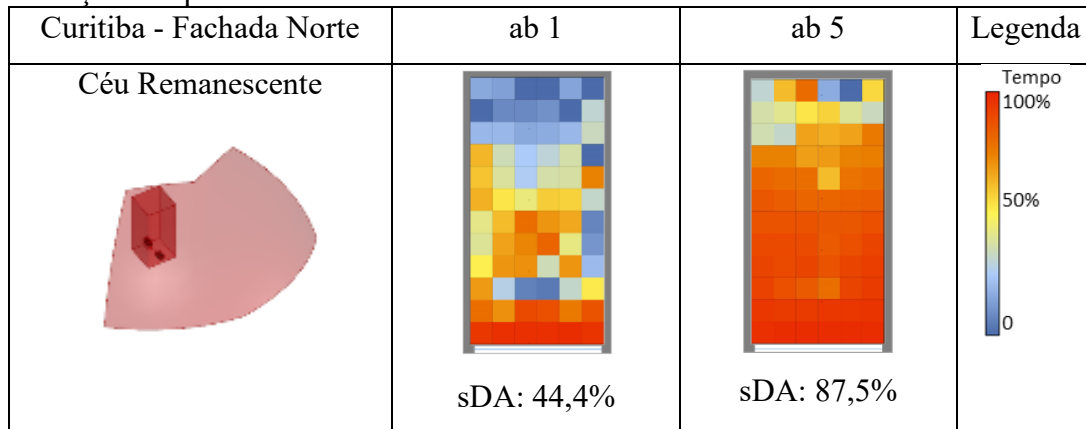
Fonte: Autora (2020)

Para analisar se a componente refletida teria o potencial de aumentar os valores de Autonomia de Luz Natural foi selecionado o caso da Fachada Norte de Curitiba para ser simulado considerando uma redução no parâmetro *ab* (*ambiente bounces* – interreflexões) para 1, para o cenário de céu Remanescente. Optou-se por analisar apenas um dos cenários visto que em todos os casos os resultados apresentaram um padrão de comportamento semelhante.

Conforme já foi mencionado no capítulo 3 – Procedimentos Metodológicos (tópicos 3.1 e 3.3.4) o parâmetro *ab* é o responsável pelo cálculo das interreflexões difusas no ambiente de análise. Esta análise foi realizada com o objetivo de verificar o quanto da área iluminada no interior do ambiente é proveniente apenas das componentes direta e celeste da luz e o quanto desta área está sendo iluminada somente por meio de inter reflexões. Os resultados mostraram que esta redução resultou em uma diminuição de 43% de área. Logo, pode-se perceber que principalmente as laterais e o fundo do ambiente são iluminados prioritariamente por meio da componente refletida da luz. Os resultados estão apresentados no Quadro 7.



Quadro 6 - Mapas de Distribuição de Autonomia de Luz Natural - Comparação entre Variações do parâmetro ab



Fonte: Autora (2020)

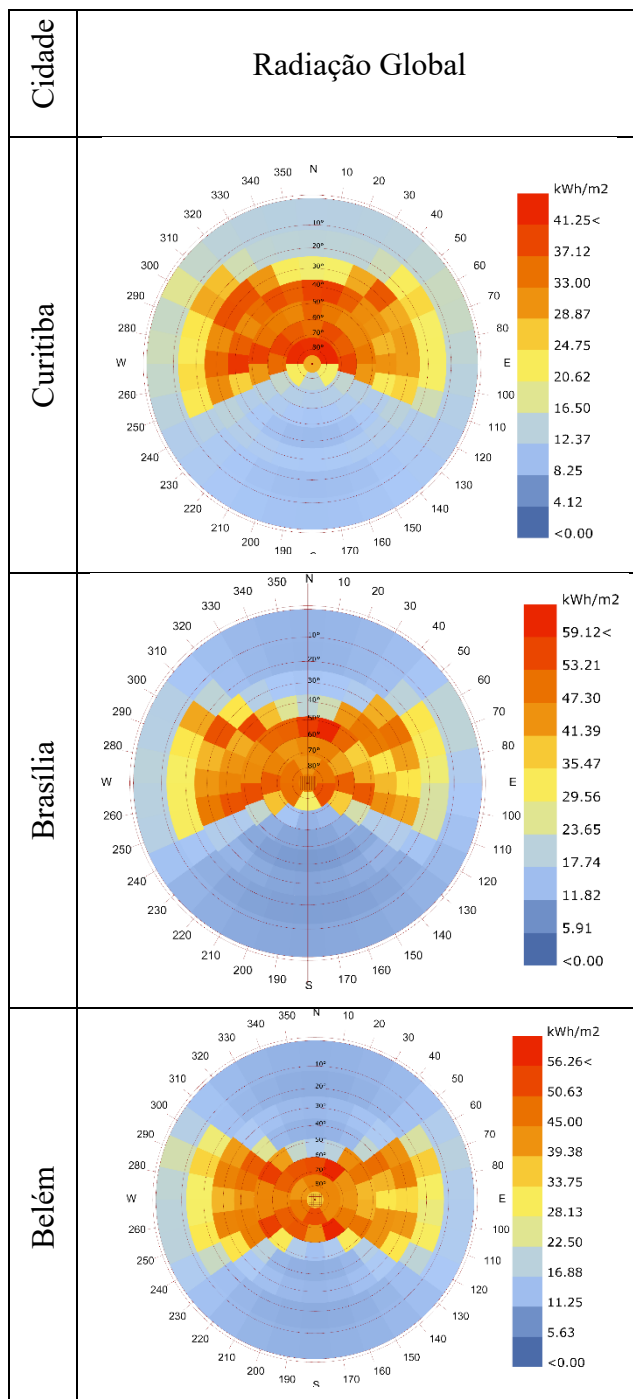
#### 4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR NA ABÓBODA CELESTE COM BASE EM ARQUIVO CLIMÁTICO

Os resultados gerados apresentam, distribuídos na abóboda celeste, a intensidade de radiação solar recebida em um determinado ponto normal à direção do centro da célula, ou seja, uma linha que parte do centro da célula e segue em direção ao centro do hemisfério. Os mapas representam um cumulativo de radiação com base no ano inteiro. O Quadro 8 mostra a representação estereográfica, em escala de cores, das abóbodas com a distribuição da radiação. Como pode-se perceber, existe uma diferença significativa de distribuição e de intensidade da radiação entre as três localidades analisadas. Estas variações se dão principalmente em função da latitude e da altura solar em que o sol passa durante o ano, bem como as condições atmosféricas em cada localidade.

De acordo com os mapas, as cidades de Brasília e Belém possuem uma influência significativa da radiação direta em relação à difusa. Já para a cidade de Curitiba podemos perceber que há uma disponibilidade menor de radiação global, sendo que a intensidade tanto da radiação direta é semelhante à da difusa. A cidade que apresentou maiores valores de radiação foi Brasília, com uma média de 23,78 kWh/m<sup>2</sup>. Belém apresentou uma média similar à Brasília, apresentando apenas 1% a menos na média de radiação em relação à esta. Entretanto, pode-se perceber que para Brasília a maior intensidade de radiação está voltada para a orientação Norte enquanto em Belém as maiores intensidades encontram-se nas orientações

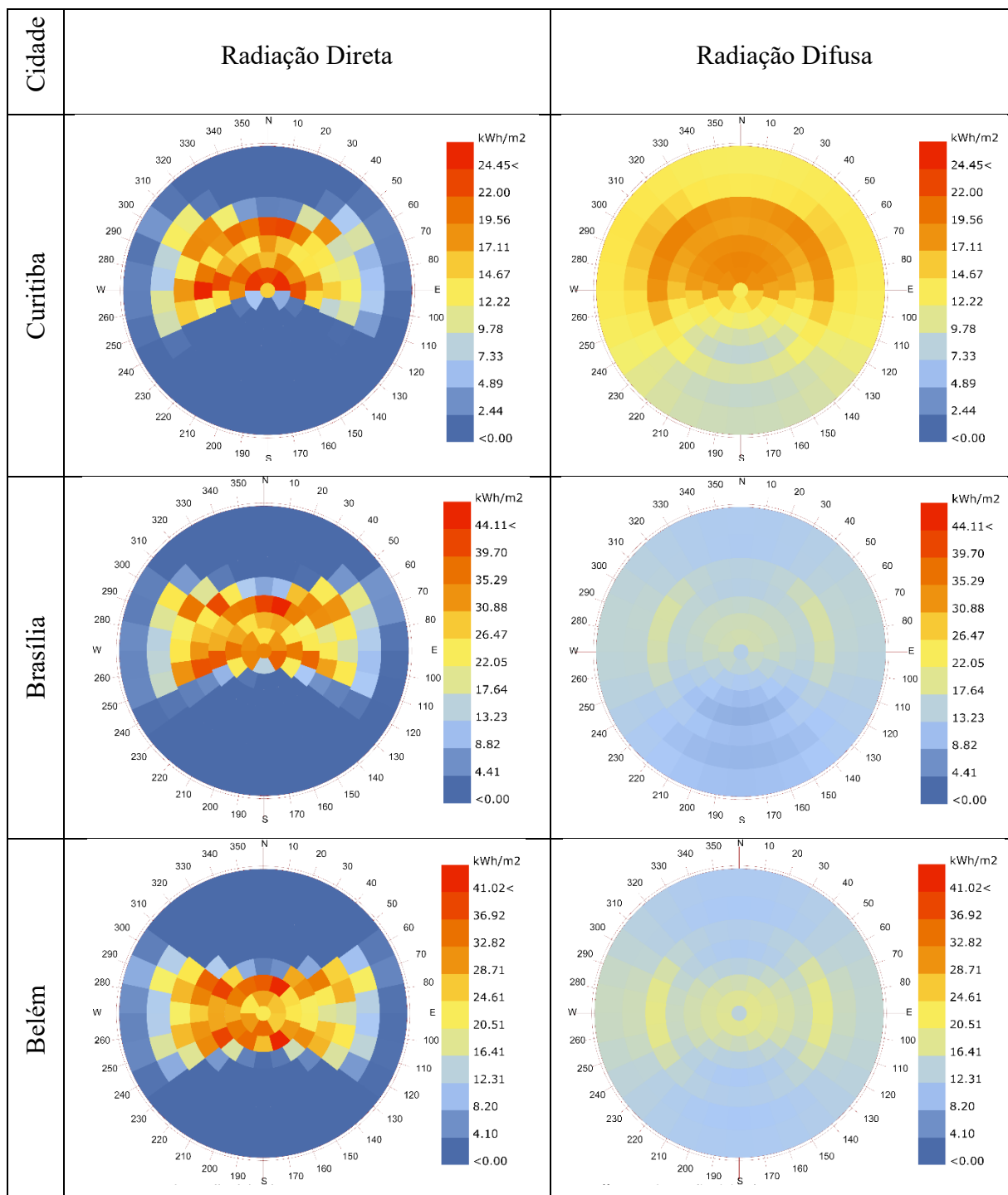
Leste e Oeste. Curitiba foi a cidade que apresentou a menor intensidade de radiação, com uma média de radiação que representa 20% a menos em relação à Brasília.

Quadro 7 - Representação Estereográfica da Distribuição da Radiação Global



Fonte: Autora (2020)

Quadro 8 - Representação Estereográfica da Distribuição da Radiação Direta e Difusa

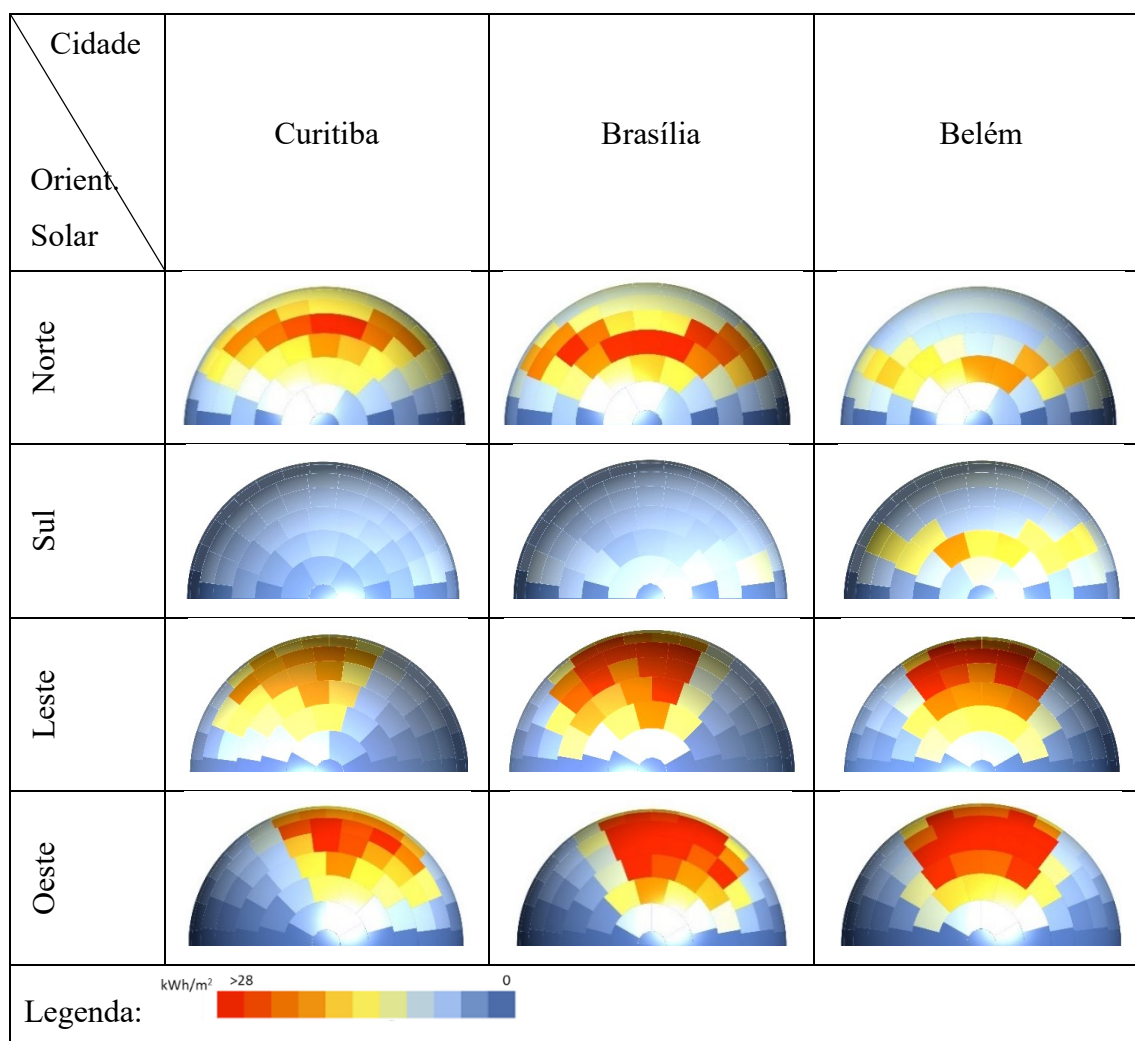


Fonte: Autora (2020)

Com base nos dados gerados, nota-se que existe uma grande variabilidade na distribuição da radiação para as três localidades estudadas. Os resultados mostraram que existe

uma grande variação tanto na intensidade quanto na direção da radiação no plano vertical. O Quadro 9 apresenta os mapas da radiação solar incidente no plano vertical. Cada mapa representa meia abóboda (meio céu) voltado para a respectiva fachada e está em projeção ortográfica. A projeção ortográfica foi uma limitação encontrada no software para o desenvolvimento do modelo de abóboda celeste. As células coloridas representam a intensidade de radiação em kWh/m<sup>2</sup>.

Quadro 9 - Mapas da Radiação Solar Incidente no Plano Vertical

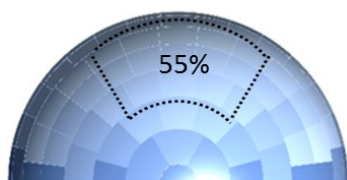


Fonte: Autora (2020)

Com os mapas foi possível notar que os limites definidos pela JCP estão deixando de contabilizar uma parcela expressiva de radiação incidente (ver Figuras 68 a 71). No cenário que apresentou maior valor de radiação, que foi o de Brasília para orientação Oeste (ver Figura 69), os ângulos considerados pela JCP estão considerando em torno de 40% de radiação em relação

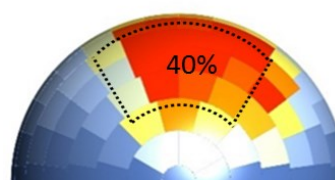
ao total de radiação recebido pelo plano vertical. Para o mapa que possui menor potencial de radiação esse percentual equivale a 55% e foi obtido para a cidade de Curitiba para orientação Sul (ver Figura 68). Os dados gerados para as orientações Leste e Oeste para Belém foram os únicos que mostraram maior potencial de radiação dentro dos ângulos da JCP, entretanto para ambos os cenários este valor representa apenas 65% do total de radiação incidente (ver Figuras 70 e 71). Para todos os casos pode-se perceber que a altura solar entre  $0^\circ$  e  $15^\circ$ , desconsiderada pelas JCP, tem uma contribuição representativa em relação ao total de radiação que está incidindo no plano vertical.

Figura 68 – Percentual de Radiação dentro da Setor definido pela JCP- Curitiba Sul



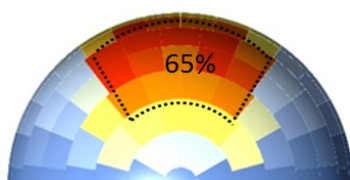
Fonte: Autora (2020)

Figura 69 - Percentual de Radiação dentro da Setor definido pela JCP - Brasília Oeste



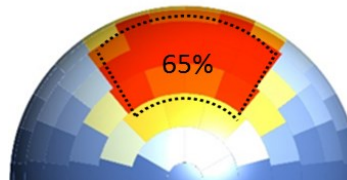
Fonte: Autora (2020)

Figura 70 - Percentual de Radiação dentro da Setor definido pela JCP - Belém Leste



Fonte: Autora (2020)

Figura 71 - Percentual de Radiação dentro da Setor definido pela JCP - Belém Oeste

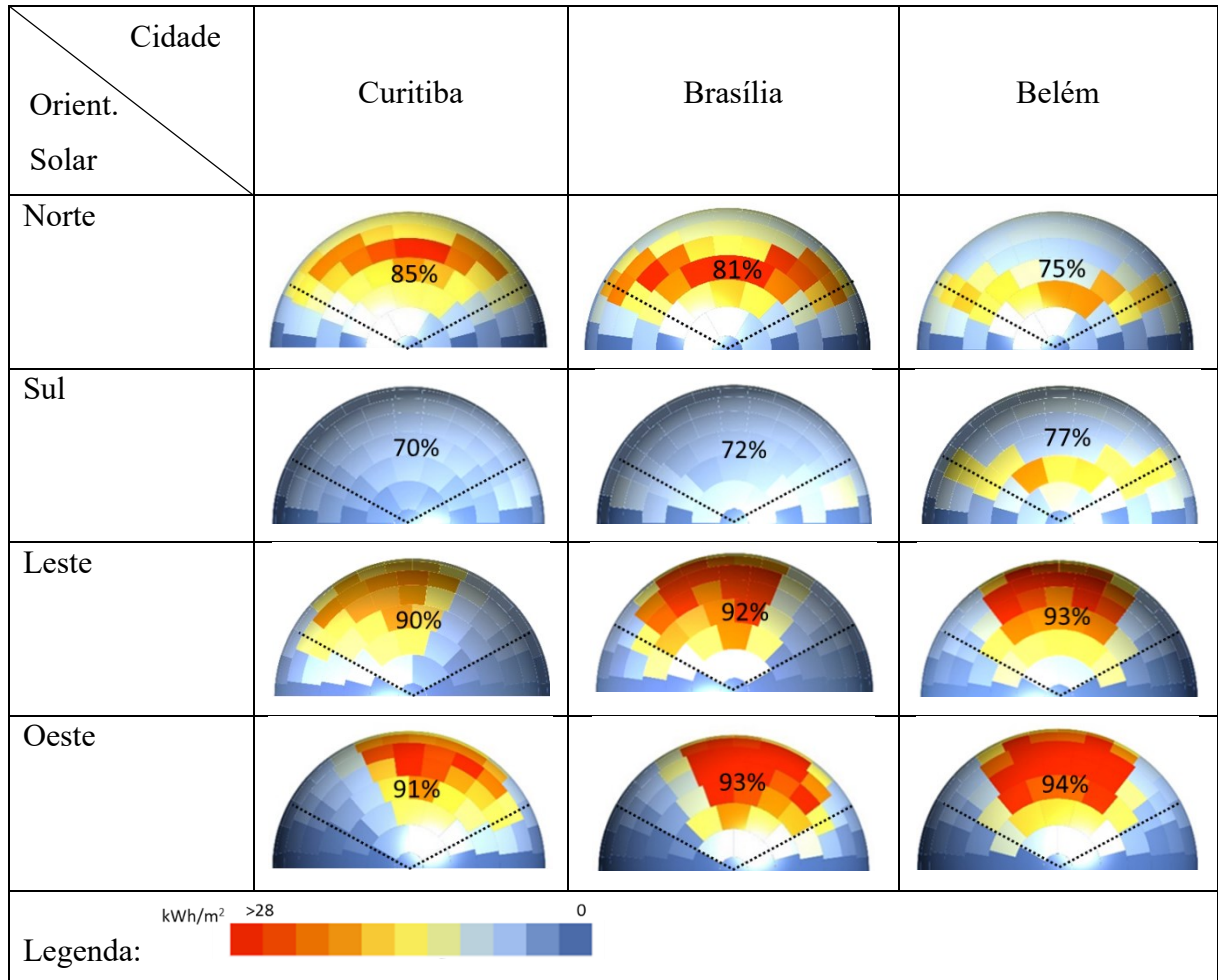


Fonte: Autora (2020)

Foi possível analisar que para todas as localidades e orientações solares o maior potencial se encontra entre  $120^\circ$  de azimute ( $60^\circ$  à direita e à esquerda). O Quadro 10 apresenta os mapas com o percentual de radiação de cada orientação solar para cada cidade estudada em que a linha pontilhada delimita o setor considerado. Pode-se notar que para a maioria dos casos o setor definido por estes ângulos representa em média 80% do potencial de radiação incidente. A maior contribuição foi obtida para Belém na orientação Oeste obtendo 94% do total e a menor para Curitiba na orientação Sul em que se obteve 70% do total. Pode-se perceber que as

orientações Sul para Curitiba e Brasília apresentaram o menor percentual em função desta fachada prevalecer a radiação difusa e, assim, estar distribuída de forma mais uniforme no céu.

Quadro 10 - Mapas com o Percentual de Radiação em 120°

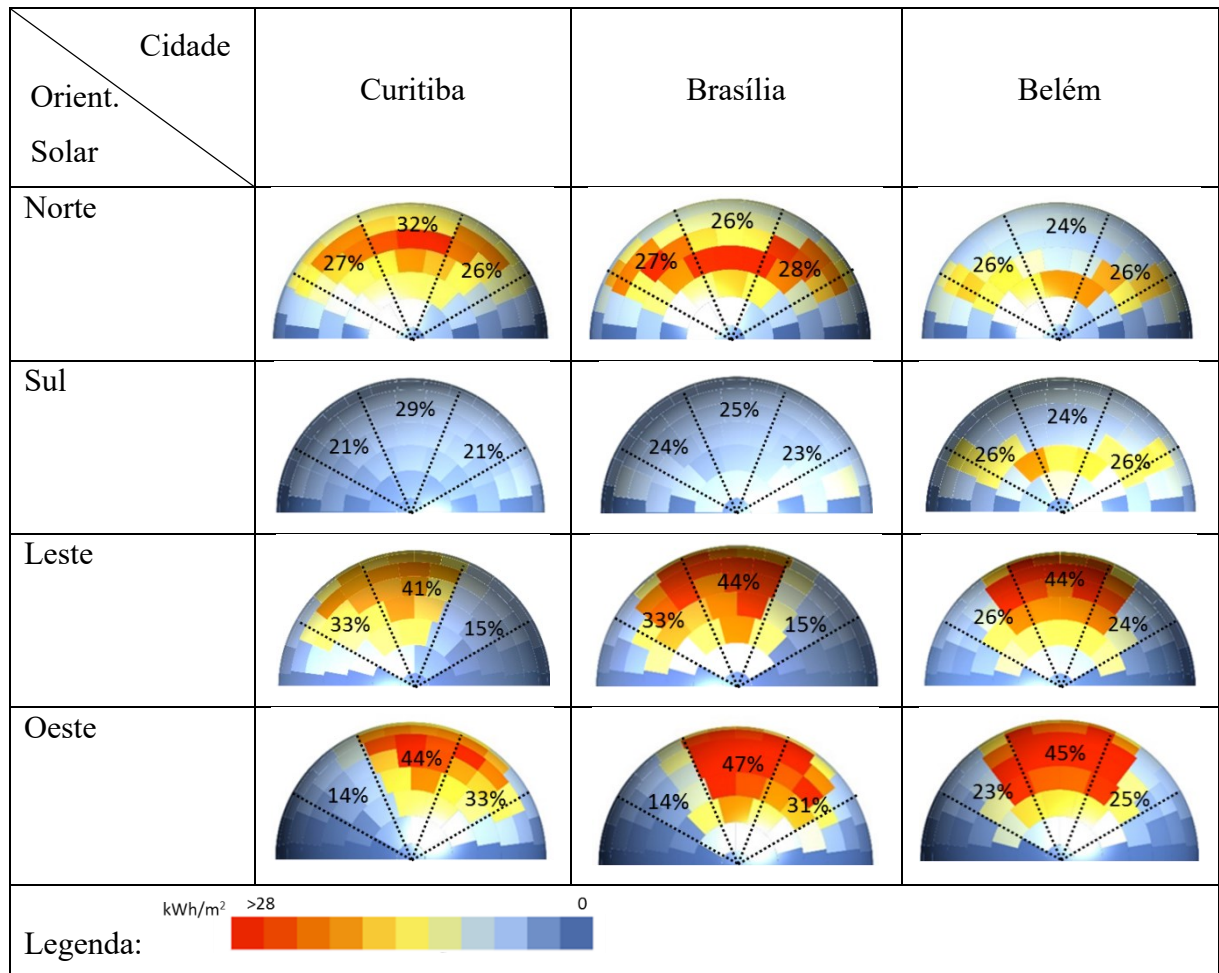


Fonte: Autora (2020)

Após a identificação deste setor angular, ele foi analisado de forma setorizada, dividindo-se em 3 partes iguais. O Quadro 11 apresenta os mapas gerados com a contribuição de cada parcela delimitadas pela linha pontilhada. Pode-se perceber que para todas as localidades nas orientações Norte e Sul a radiação está distribuída de forma mais uniforme da abóboda celeste, com contribuições que ficam em torno de 30% – 25% para cada parcela. Pode-se perceber que este resultado se dá para Sul em todas as localidades e para Norte em Belém em função de prevalecer nessas orientações a radiação difusa. Para Norte em Curitiba e Brasília também possuem uma distribuição mais uniforme em função de sua latitude e trajetória solar que permite que o plano vertical receba radiação direta ao longo de todo o ano em todos os

horários do dia. Já para as orientações Leste e Oeste pode-se perceber que o setor frontal é o que possui maior contribuição em detrimento do restante do céu, que representa mais de 40% para todas as localidades. Pode-se perceber que para a orientação Leste tanto para Curitiba quanto para Brasília orientação Nordeste a intensidade de radiação representa o dobro da orientação Sudeste. Para a orientação Oeste ocorre exatamente o oposto. Já para estas duas orientações para Belém as laterais têm intensidades semelhantes, mas a parcela frontal ainda representa a contribuição mais significativa. Este comportamento acontece em função da trajetória solar que permite que a radiação solar direta incida perpendicularmente ao plano vertical todos os dias ao longo do ano.

Quadro 11 - Mapas com o Percentual de Radiação – Subdivisão em três setores

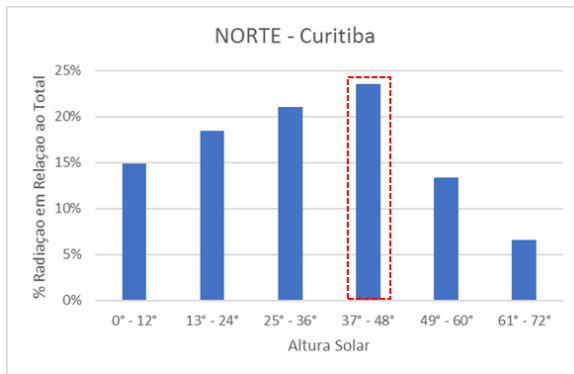


Fonte: Autora (2020)

As Figuras 72 a 83 mostram o percentual de contribuição de altitude solar em relação ao total por meio das faixas horizontais da abóboda de Tregenza (1987). Para a orientação Norte para Curitiba pode-se perceber que a maior contribuição se apresenta nas faixas de altura solar mais alta ( $37^\circ - 48^\circ$ ). Já para as orientações Sul de todas as localidades e para orientação Norte em Belém a maior contribuição encontra-se nas faixas de altura solar mais baixa ( $0^\circ - 12^\circ$  e  $13^\circ - 24^\circ$ ). Para a orientação Norte entende-se que essa contribuição se deve em função da trajetória solar, entretanto para as outras, em que prevalece a radiação difusa, as maiores contribuições estão entre  $0^\circ$  e  $12^\circ$  para Curitiba e Brasília e entre  $12^\circ$  e  $24^\circ$  para Norte e Sul em Belém.

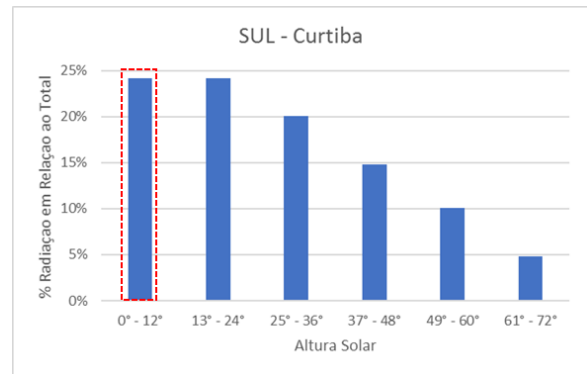


Figura 72 - Contribuição da Radiação Solar - Norte Curitiba



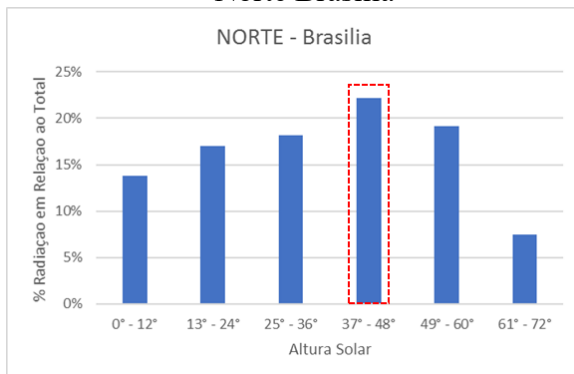
Fonte: Autora (2020)

Figura 73 - Contribuição da Radiação Solar - Sul Curitiba



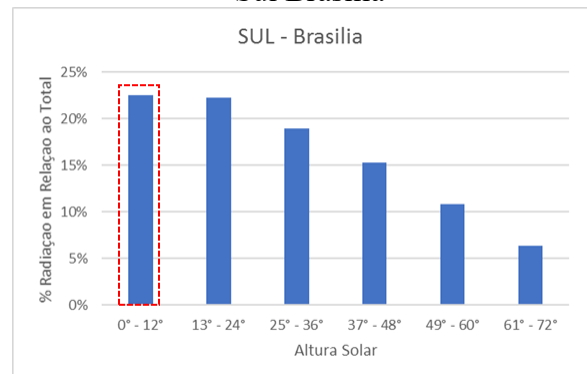
Fonte: Autora (2020)

Figura 74 - Contribuição da Radiação Solar - Norte Brasília



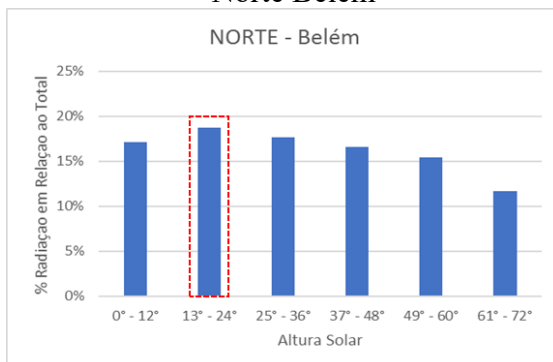
Fonte: Autora (2020)

Figura 75 - Contribuição da Radiação Solar - Sul Brasília



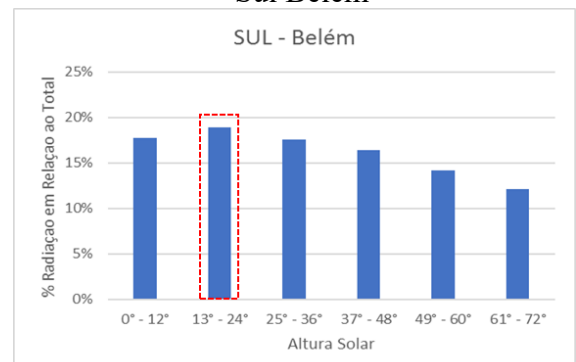
Fonte: Autora (2020)

Figura 76 - Contribuição da Radiação Solar - Norte Belém



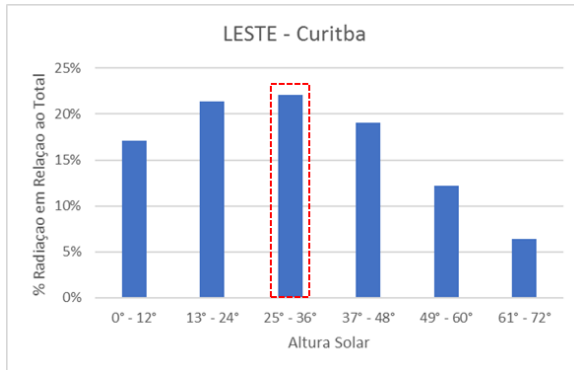
Fonte: Autora (2020)

Figura 77 - Contribuição da Radiação Solar - Sul Belém



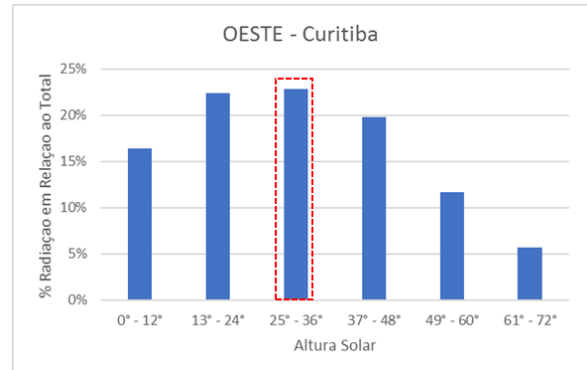
Fonte: Autora (2020)

Figura 78 - Contribuição da Radiação Solar - Leste Curitiba



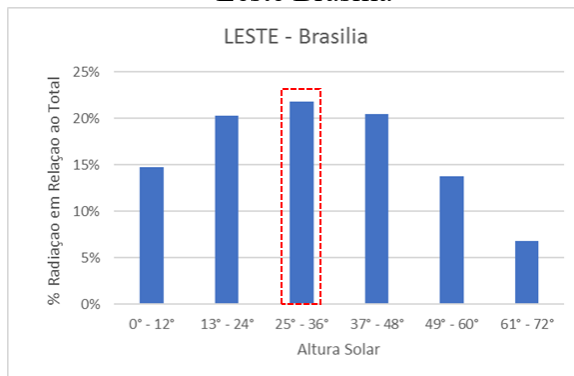
Fonte: Autora (2020)

Figura 79 - Contribuição da Radiação Solar Oeste Curitiba



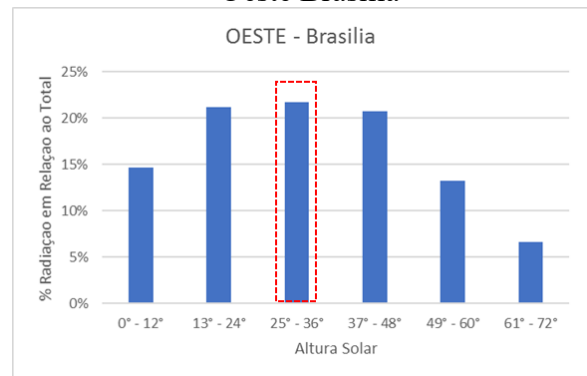
Fonte: Autora (2020)

Figura 80 - Contribuição da Radiação Solar - Leste Brasília



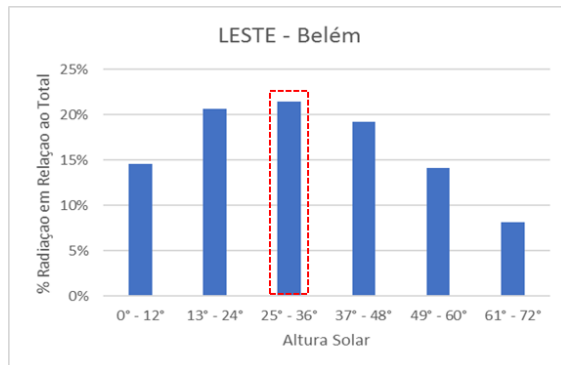
Fonte: Autora (2020)

Figura 81 - Contribuição da Radiação Solar - Oeste Brasília



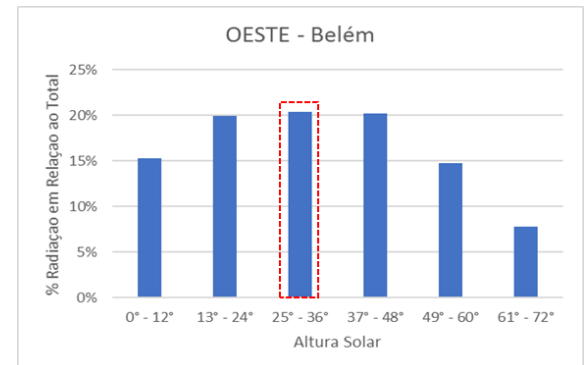
Fonte: Autora (2020)

Figura 82 - Contribuição da Radiação Solar Leste Belém



Fonte: Autora (2020)

Figura 83 - Contribuição da Radiação Solar Oeste Belém



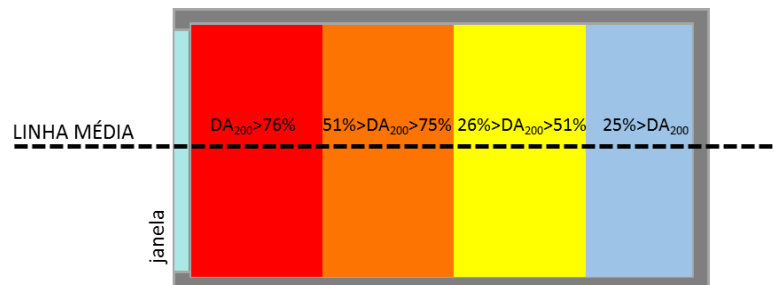
Fonte: Autora (2020)

### 4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações computacionais em que os cenários propostos estão obstruindo diferentes parcelas de céu. No tópico 4.3.1 são apresentadas as análises relacionando a radiação incidente no plano vertical com os resultados de Autonomia de Luz Natural e Autonomia de Luz Natural Espacial. Foram apresentados também os resultados das simulações de radiação na janela em que é identificado quanto da radiação recebida pela janela é proveniente do céu e sol e quanto é proveniente da componente refletida externa (CRE). No tópico 4.3.2 são apresentadas as análises comparativas que buscaram entender a influência da componente refletida externa e dos espaços vazios entre edifícios no desempenho luminoso do ambiente interno.

Para a realização das análises foi utilizada uma representação gráfica que apresenta o valor de Autonomia de Luz Natural (DA) para 200 lux em cada ponto do eixo central da malha de cálculo no sentido da profundidade do ambiente. A Figura 84 apresenta como foram zoneados os valores de DA, onde a cor vermelha representa os valores acima de 76% das horas anuais, em laranja os valores que ficaram entre 75% e 51%, em amarelo os valores entre 50% e 26% e em azul os valores abaixo de 25%. Por meio deste gráfico foi possível comparar para cada cenário a variabilidade do percentual de horas que atingem e ultrapassam 200 lux para cada ponto da malha ao longo do ano e verificar a influência da componente refletida externa (CRE) no interior do ambiente.

Figura 84 - Exemplo de Representação Gráfica do Zoneamento



Fonte: Autora (2020)

### **4.3.1 Relação entre os resultados de Autonomia de Luz Natural Espacial e Radiação Solar Incidente**

Os resultados apresentados neste capítulo mostram uma análise acerca do comportamento da luz no ambiente interno e sua relação com a quantidade de radiação do céu e do sol obstruída com base no arquivo climático.

#### **4.3.1.1 Resultados para Cenários com Obstrução Contínua**

Neste tópico é apresentada uma comparação entre os valores obtidos nas simulações de cenários com obstrução contínua conforme descrito no tópico 3.3.1. As comparações mostram os cenários considerando uma redução da componente refletida externa (CRE) em relação às simulações que consideraram uma refletância média de 0,35. Também são apresentados os resultados da radiação incidente na janela buscando analisar o quanto de radiação é proveniente do céu e sol e o quanto é proveniente da CRE. A Figura 85 apresenta essa comparação. Os cenários comparados apresentam a obstrução afastada 5 metros em relação ao objeto de análise. Conforme já foi mencionado no tópico 4.3, cada linha da Figura 80 representa um cenário e cada célula colorida o valor de Autonomia de Luz Natural ( $DA_{200}$ ) ao longo da malha no sentido de sua profundidade. A esquerda estão os resultados para os cenários com a redução da componente refletida e a direita os cenários que consideraram uma refletância média para as obstruções externas.

Figura 85 - Comparação entre cenários com afastamento de 5 metros - Valores de Autonomia de Luz Natural ao Longo da Malha de Cálculo

Cidade	Orientação Solar	Obstrução	CRE = 0,05   ab = 1													sDA	CRE = 0,35   ab = 5													sDA
			0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	0,5m		1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m			
BRA NORTE Ang 12°	95	95	93	93	90	81	53	10	0	0	0	0	54.2	95	95	94	93	92	90	87	81	74	37	32	25	79.2				
BRA NORTE Ang 24°	95	94	93	90	71	0	0	0	0	0	0	0	40.3	95	95	93	92	89	82	77	64	42	24	14	5	65.3				
BRA NORTE Ang 36°	95	93	91	8	0	0	0	0	0	0	0	0	25	95	94	93	86	82	79	68	48	29	12	5	2	58.3				
BRA NORTE Ang 48°	95	92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	95	93	88	83	78	66	48	27	9	2	1	1	50				
BRA NORTE Ang 60°	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	94	89	83	72	54	40	23	10	4	2	1	1	38.9				
BRA NORTE Ang 72°	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	92	85	64	45	31	18	9	5	2	1	1	1	25				
BRA SUL Ang 12°	95	95	93	93	89	74	22	0	0	0	0	0	50	95	95	94	93	92	90	86	81	72	28	21	21	73.6				
BRA SUL Ang 24°	95	94	93	90	54	0	0	0	0	0	0	0	36.1	95	95	93	92	89	82	77	64	42	25	14	12	65.3				
BRA SUL Ang 36°	95	94	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	95	94	93	87	83	79	70	50	35	20	9	9	61.1				
BRA SUL Ang 48°	95	93	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	95	93	89	85	79	73	60	43	29	19	12	9	58.3				
BRA SUL Ang 60°	93	13	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	94	90	86	80	74	64	45	34	23	13	7	6	50				
BRA SUL Ang 72°	88	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	92	85	80	68	58	44	32	23	15	9	2	3	41.7				
BRA LESTE Ang 12°	95	95	93	92	87	74	40	14	1	0	0	0	51.4	95	95	94	93	92	87	83	73	67	42	37	35	77.8				
BRA LESTE Ang 24°	94	94	93	87	59	0	0	0	0	0	0	0	40.3	95	94	93	92	86	77	71	61	49	32	24	16	66.7				
BRA LESTE Ang 36°	94	93	89	10	0	0	0	0	0	0	0	0	25	95	94	92	86	82	75	67	53	35	21	14	9	63.9				
BRA LESTE Ang 48°	94	92	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	95	93	91	85	77	65	51	38	21	13	10	8	52.8				
BRA LESTE Ang 60°	93	21	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	12.5	94	92	89	74	62	49	34	24	16	11	8	8	41.7				
BRA LESTE Ang 72°	86	10	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	93	91	73	60	48	31	23	16	11	8	6	6	33.3				
BRA OESTE Ang 12°	95	95	94	93	92	87	57	28	9	2	0	0	54.2	95	95	94	93	93	92	89	80	52	49	44	41.9					
BRA OESTE Ang 24°	95	94	93	93	73	0	0	0	0	0	0	0	40.3	95	95	93	93	92	85	80	68	47	36	25	16	66.7				
BRA OESTE Ang 36°	95	94	93	15	0	0	0	0	0	0	0	0	25	95	94	93	86	81	76	70	48	35	21	13	10	58.3				
BRA OESTE Ang 48°	95	93	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	95	93	85	79	72	67	53	33	24	14	9	9	54.2				
BRA OESTE Ang 60°	93	18	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	11.1	94	87	77	65	61	51	33	25	17	11	7	7	45.8				
BRA OESTE Ang 72°	87	9	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	92	80	64	53	46	33	21	16	10	7	5	5	31.9				
CWB NORTE Ang 12°	94	94	92	90	86	79	62	19	0	0	0	0	54.2	94	94	93	91	88	87	81	77	68	25	23	18	73.6				
CWB NORTE Ang 24°	94	94	91	87	74	0	0	0	0	0	0	0	41.7	94	94	92	89	85	76	67	47	24	11	4	2	58.3				
CWB NORTE Ang 36°	94	93	88	12	0	0	0	0	0	0	0	0	25	94	93	90	81	75	66	52	21	9	2	0	0	52.8				
CWB NORTE Ang 48°	94	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	94	91	84	76	64	47	21	6	1	0	0	0	41.7				
CWB NORTE Ang 60°	92	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	93	86	78	57	40	23	3	0	0	0	0	0	30.6				
CWB NORTE Ang 72°	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	90	81	56	32	18	1	0	0	0	0	0	0	22.2				
CWB SUL Ang 12°	94	94	92	90	86	74	24	0	0	0	0	0	50	94	94	93	91	88	86	81	71	50	11	8	7	68.1				
CWB SUL Ang 24°	94	94	91	87	52	0	0	0	0	0	0	0	36.1	94	94	92	89	85	74	63	39	18	8	4	2	58.3				
CWB SUL Ang 36°	94	93	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	94	93	90	82	76	67	51	26	14	5	3	1	52.8				
CWB SUL Ang 48°	94	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	94	91	85	79	72	59	39	21	11	5	2	1	50				
CWB SUL Ang 60°	92	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	93	87	82	74	64	47	27	15	7	4	1	1	41.7				
CWB SUL Ang 72°	86	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	90	83	75	61	45	28	16	9	4	1	0	0	33.3				
CWB LESTE Ang 12°	94	94	92	89	85	75	42	12	0	0	0	0	51.4	94	94	93	90	88	85	78	69	57	25	22	20	72.2				
CWB LESTE Ang 24°	94	94	91	86	61	0	0	0	0	0	0	0	40.3	94	94	91	88	83	71	62	46	28	14	8	4	58.3				
CWB LESTE Ang 36°	94	92	87	7	0	0	0	0	0	0	0	0	25	94	93	89	82	74	64	51	31	16	7	4	1	52.8				
CWB LESTE Ang 48°	94	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	94	91	86	78	68	52	33	17	9	3	1	1	45.8				
CWB LESTE Ang 60°	92	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	93	88	85	67	51	33	18	10	5	3	1	1	36.1				
CWB LESTE Ang 72°	85	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	90	86	69	47	30	17	11	7	3	1	1	0	25				
CWB OESTE Ang 12°	94	94	93	90	88	83	53	23	6	0	1	0	52.8	94	94	93	91	89	88	85	79	68	28	28	23	73.6				
CWB OESTE Ang 24°	94	94	91	88	72	0	0	0	0	0	0	0	40.3	94	94	92	90	87	77	67	49	28	13	5	2	59.7				
CWB OESTE Ang 36°	94	93	89	12	0	0	0	0	0	0	0	0	25	94	93	90	82	75	65	51	29	16	5	2	1	52.8				
CWB OESTE Ang 48°	94	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	94	92	82	75	65	52	34	17	9	3	2	1	45.8				
CWB OESTE Ang 60°	93	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	93	85	76	63	51	34	19	11	6	3	1	1	36.1				
CWB OESTE Ang 72°	86	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	89	78	64	43	30	18	11	7	4	1	1	0	25				
BEL NORTE Ang 12°	95	96	93	91	89	80	35	0	0	0	0	0	51.4	96	96	94	91	90	89	87	80	69	30	22	17	75				
BEL NORTE Ang 24°	95	95	92	89	66	0	0	0	0	0	0	0	38.9	96	95	92	90	89	82	72	56	36	16	8	7	62.5				
BEL NORTE Ang 36°	95	93	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	96	94	91	87	82	75	62	43	26	11	7	3	58.3				
BEL NORTE Ang 48°	95	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	96	92	88	82	79	66	49	33	17	10	5	5	50				
BEL NORTE Ang 60°	93	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	94	89	84	79	67	49	32	18	11	7	3	3	41.7				
BEL NORTE Ang 72°	89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	90	84	76	56	35	22	16	11	7	3	1	1	30.6				
BEL SUL Ang 12°	95	96	93	91	89	79	36	0	0	0	0	0	51.4	96	96	94	91	91	89	87	81	70	30	25	17	75				
BEL SUL Ang 24°	95	95	92	89	62	0	0	0	0	0	0	0	37.5	96	95	92	91	89	83	74	57	37	16	9	7	63.9				
BEL SUL Ang 36°	95	93	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	95	94	91	87	84	75	65	44	25	12	7	6	58.3				
BEL SUL Ang 48°	95	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	96	92	88	85	78	71	52	33	17	11	7	4	52.8				
BEL SUL Ang 60°	93	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	94	89	86	78	70	53	34	20	13	9	5	5	45.8				
BEL SUL Ang 72°	89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	90	87	78	61	39	22	17	12	8	4	2	1	31.9				
BEL LESTE Ang 12°	95	96	92	91	89	76	40	15	0	0	0	0	51.4	96	96	93	91	89	88	82	71	67	37	32	28	75				
BEL LESTE Ang 24°	95	95	91	89	64	0	0	0	0	0	0	0	37.5	96	95	92	90	87	79	70	60	49	28	20	10	66.7				
BEL LESTE Ang 36°	95	93	8																											

Analisando-se os resultados da direita, referentes às simulações que consideram a minimização da CRE, os resultados apresentaram um comportamento semelhante para todas as orientações solares e localidades estudadas. Foram obtidos o mesmo valor para os resultados de Autonomia de Luz Natural Espacial ( $sDA_{200/50\%}$ ) independentemente da orientação solar e localidade. A minimização do número de interreflexões permitiu identificar que quanto menor a obstrução mais existem diferenças dos valores de  $sDA_{200/50\%}$  dependendo da localidade ou orientação solar e quanto maior a obstrução, quase não existem variações nestes valores. Este fato se deve pois, para obstruções maiores, a energia refletida das superfícies externas tem uma influência maior para gerar uma variação nos valores de iluminação natural no interior do ambiente se comparado à parcela de céu visível. Já para obstruções menores, em função da parcela de céu visível ser maior, a variabilidade de radiação dependendo da localidade e orientação solar tem maior influência em como a luz incide e se distribui no ambiente interno.

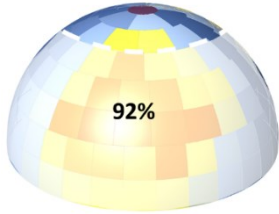
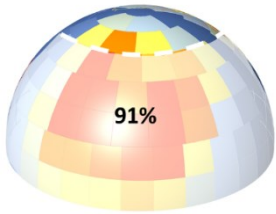
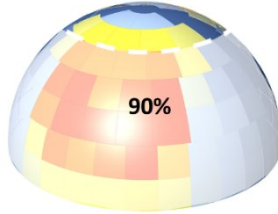
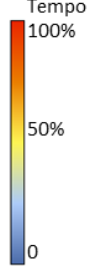
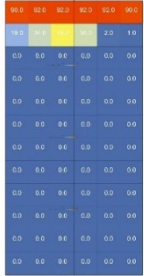
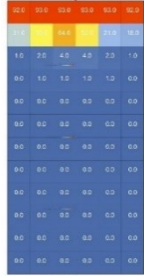
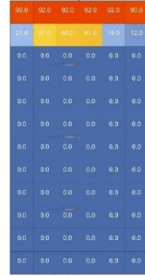
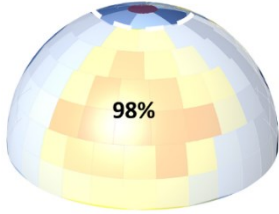
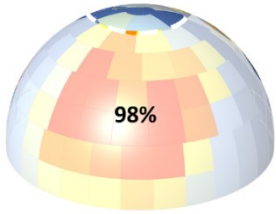
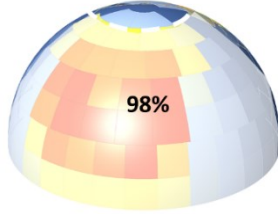
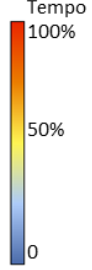
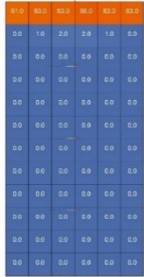
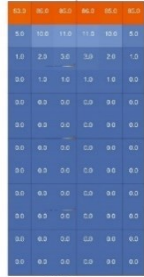
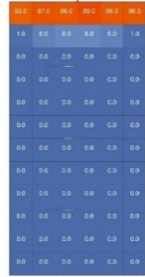
Para obstruções contínuas com ângulo de obstrução vertical igual a  $12^\circ$  é possível identificar que o ambiente recebe 200 lux acima de 50% das horas anuais de 3 a 3,5 metros da profundidade do ambiente. Já para obstruções mais altas, com ângulo de obstrução vertical entre  $60^\circ$  e  $72^\circ$ , podem-se perceber que somente 0,5 metros de profundidade atingem este nível de iluminação natural. O cenário que considerou uma refletância externa média (35%) permitiu um aumento de 1 a 1,50 metros no sentido da profundidade do ambiente em que se atinge o valor de 200 lux por mais de 50% das horas anuais. Acredita-se que o software está representando o comportamento físico de forma adequada, visto que a componente refletida externa é responsável pelo aumento de energia de forma difusa em 35%. No cálculo de Autonomia de Luz Natural, a componente difusa garante que cada ponto seja iluminado por uma parcela maior de tempo. Quando se interpreta o fenômeno físico, pode-se perceber que em cenários em que a componente refletida tanto das superfícies internas quanto das externas são mais claras, as iluminâncias se mostram mais uniformes no ambiente como um todo. Conseqüentemente, a energia que incide sob essas superfícies pode ser refletida para o fundo do ambiente e garantir níveis de iluminação natural por um período mais prolongado. Portanto, é coerente o fato de os resultados mostrarem que a energia proveniente apenas do céu e do sol produza menos iluminâncias no fundo do ambiente. Deste aumento, pode-se perceber que os maiores valores são em cenários com obstruções mais altas. Questões mais aprofundadas referentes à refletância serão tratadas no capítulo 4.3.2, entretanto este mapeamento permitiu

identificar o quanto da iluminação no interior do ambiente é proveniente majoritariamente do céu e do sol para as respectivas obstruções.

Destaca-se que para os cenários com obstruções de 60° e 72° foram obtidos valores idênticos de  $sDA_{200/50\%}$  em todas as cidades e orientações solares, com exceção das orientações Leste e Oeste para Brasília e Belém. Pode-se perceber que a parcela de céu visível nessas condições se caracteriza predominantemente por radiação difusa e de intensidades semelhantes, portanto, é plausível que os resultados sejam idênticos. Nos casos das exceções mencionadas nota-se que a radiação disponível acima de 60° é maior se comparada à Curitiba, por exemplo. Assim, esta variação de radiação presente a uma altura solar maior permite que o ambiente interno receba uma maior quantidade de iluminação natural. O Quadro 12 apresenta uma relação entre a distribuição da radiação solar na abóboda celeste e a distribuição de iluminação natural no interior do ambiente para os cenários com obstrução de 60° e 72° para orientação Leste. Optou-se por apresentar apenas os resultados para a orientação Leste, visto que aqueles para Oeste são semelhantes.

Na primeira linha, são apresentadas as abóbodas celestes com o mapeamento da radiação solar no plano vertical indicando a quantidade de radiação está sendo obstruída para Curitiba, Brasília e Belém. Na segunda linha apresenta-se o mapa de distribuição dos valores de Autonomia de Luz Natural para 200 lux e o valor de  $sDA_{200/50\%}$  obtido para cada cenário para as mesmas cidades. Observa-se que apesar de em Brasília e Belém a radiação obstruída representar apenas 1% a menos em relação a Curitiba, em termos de valores absolutos isso representa 23kWh/m<sup>2</sup> e 30kWh/m<sup>2</sup> a mais de radiação recebida no ambiente interno, respectivamente. Esta quantidade de radiação permite que a segunda linha da malha de cálculo receba valores de iluminância acima de 200 lux por mais de 50% das horas anuais proveniente apenas do céu e do sol, o que representa um aumento de 3% e 4% de área para Brasília e Belém, respectivamente. Pode-se perceber nas linhas seguintes, referente ao cenário com obstrução de 72°, que os valores de radiação desobstruída são muito próximos, apresentando diferenças inferiores a 5 kWh/m<sup>2</sup>, logo, o comportamento no interior do ambiente também é semelhante.

Quadro 12 – Percentual de Radiação Obstruída - Relação entre Valores de Radiação e de Autonomia de Luz Natural

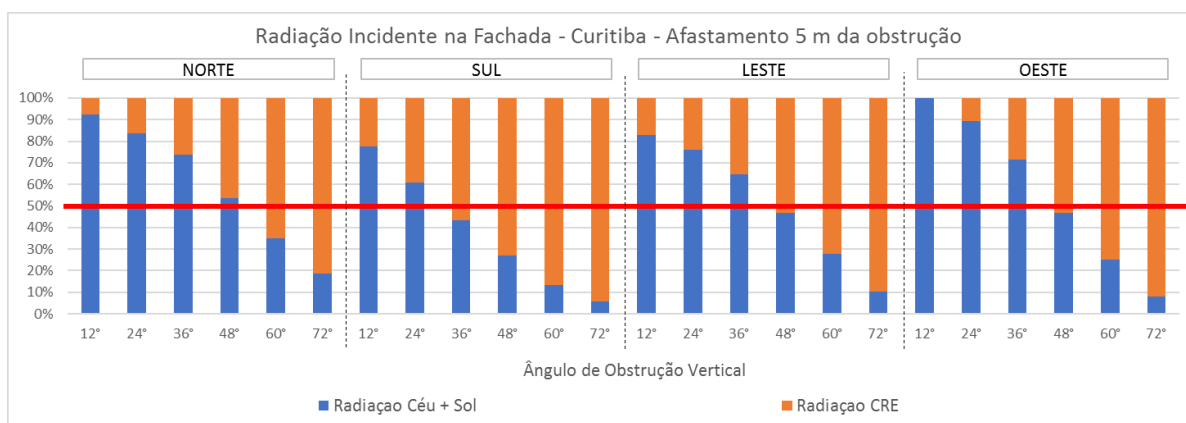
	Curitiba	Brasília	Belém	Legenda
Ângulo de obstrução vertical 60°	 <p><b>92%</b></p> <p>Radiação Incidente: 53,52 kWh/m<sup>2</sup></p>	 <p><b>91%</b></p> <p>Radiação Incidente: 76,52 kWh/m<sup>2</sup></p>	 <p><b>90%</b></p> <p>Radiação Incidente: 83,89 kWh/m<sup>2</sup></p>	 <p>Tempo 100% 50% 0</p>
	 <p>sDA<sub>200/50%</sub>: 8,3%</p>	 <p>sDA<sub>200/50%</sub>: 11,1%</p>	 <p>sDA<sub>200/50%</sub>: 12,5%</p>	
Ângulo de obstrução vertical 72°	 <p><b>98%</b></p> <p>Radiação Incidente: 11,13 kWh/m<sup>2</sup></p>	 <p><b>98%</b></p> <p>Radiação Incidente: 18,37 kWh/m<sup>2</sup></p>	 <p><b>98%</b></p> <p>Radiação Incidente: 15,36 kWh/m<sup>2</sup></p>	 <p>Tempo 100% 50% 0</p>
	 <p>sDA<sub>200/50%</sub>: 8,3%</p>	 <p>sDA<sub>200/50%</sub>: 8,3%</p>	 <p>sDA<sub>200/50%</sub>: 8,3%</p>	

Fonte: Autora (2020)



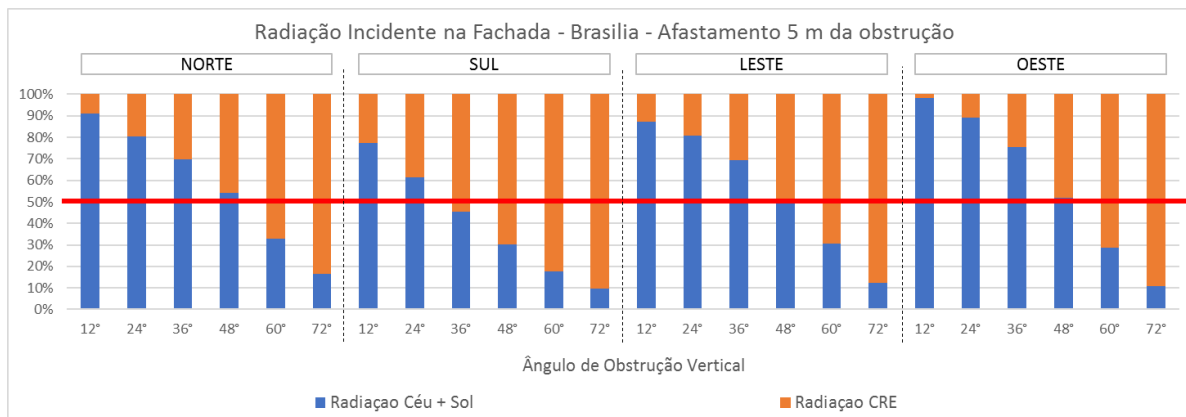
As Figuras 86, 87 e 88 apresentam os valores obtidos para as simulações de radiação solar na janela para Curitiba, Brasília e Belém, respectivamente. Foram desmembrados os valores referentes à radiação proveniente somente do céu e sol (azul) e àquela proveniente apenas da componente refletida externa (CRE - laranja). Com isso, foi possível identificar em termos percentuais, para cada cenário, o quanto de cada componente da radiação é responsável pelo total recebido pela janela. Os gráficos mostram um comportamento padrão, em que a CRE passa a ter maior influência no total de radiação recebida pela janela a partir de obstruções com ângulo vertical de 48°, onde os valores ficam próximos ou superam 50% do total. Nota-se que os cenários de Curitiba e Brasília na fachada Sul apresentaram uma exceção, em que a parcela referente à CRE ultrapassa 50% do total de radiação a partir de uma obstrução com ângulo vertical de 36°. Esse comportamento ocorre devido à maior quantidade de radiação direta incidente na fachada oposta (Norte) que permite que ela seja refletida para o ambiente de análise. Vale ressaltar que para os cenários com obstruções mais baixas (12° e 24°) o próprio objeto de análise produz obstrução em relação àquela que foi colocada no cenário afim de produzir obstrução, o que faz com que uma parcela menor da CRE seja recebida pela janela.

Figura 86 - Contribuição de Radiação Recebida pela Janela Curitiba



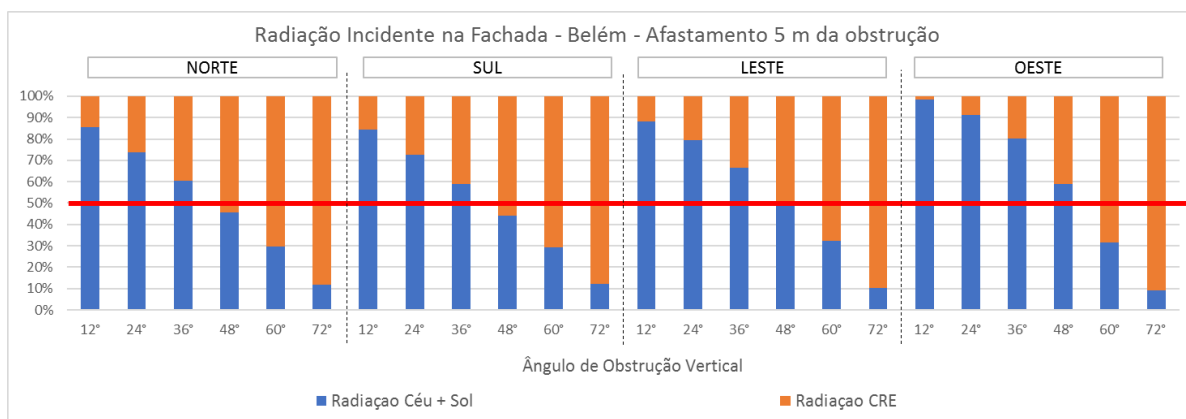
Fonte: Autora (2020)

Figura 87 - Contribuição de Radiação Recebida pela Janela - Brasília



Fonte: Autora (2020)

Figura 88 - Contribuição de Radiação Recebida pela Janela Belém



Fonte: Autora (2020)

Podemos identificar que, para obstruções contínuas, quanto mais alta é a obstrução em relação ao objeto de análise, maior a contribuição da CRE no total de radiação incidente na fachada e, conseqüentemente, no comportamento da iluminação natural no ambiente interno. Questões referentes especificamente à relação da CRE com o comportamento luminoso no ambiente interno serão tratadas no tópico 4.3.2.

#### 4.3.1.2 Resultados para Cenários com Obstruções Irregulares

No tópico 4.3.1.2, são apresentados casos pontuais que chamaram a atenção por apresentarem um comportamento fora do padrão em relação às demais características de variabilidade urbana estudadas. São apresentados os resultados da radiação incidente na janela

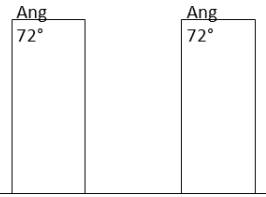
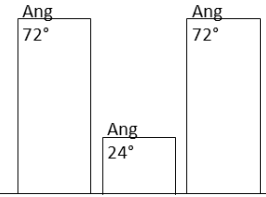
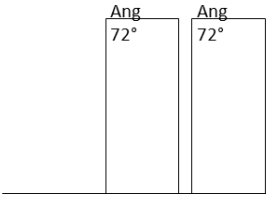
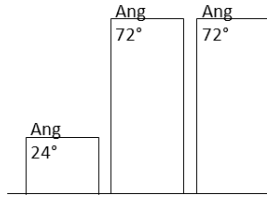
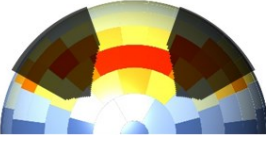

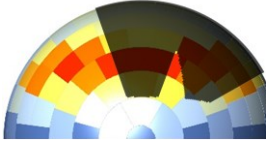

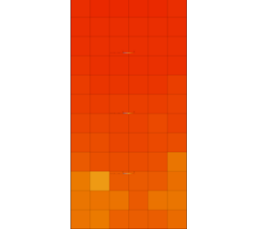
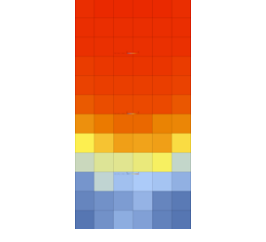
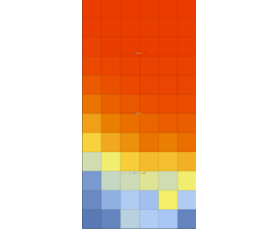
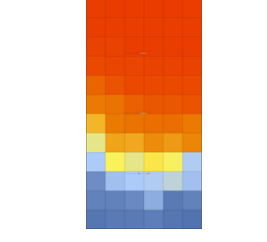
buscando analisar o quanto de radiação é proveniente do céu e sol e o quanto é proveniente da CRE. Neste tópico são apresentados os casos referentes aos cenários com obstruções irregulares. O Anexo A apresenta um comparativo entre os valores de Autonomia de Luz Natural onde a esquerda estão os resultados para os cenários com a redução da componente refletida e a direita os cenários que consideraram uma refletância média de 0,35 para as obstruções externas. Conforme já foi mencionado no tópico 4.3, cada linha representa um cenário e cada célula colorida o valor de Autonomia de Luz Natural ( $DA_{200}$ ) ao longo da malha no sentido de sua profundidade.

Analisando o mapeamento realizado, podemos perceber que aqueles que apresentaram obstruções predominantemente altas (ângulo vertical de  $72^\circ$ ), mas possuem espaços vazios entre si tem o potencial de iluminar o ambiente por até 2 metros a mais de profundidade se comparados à uma obstrução contínua de mesmo ângulo. O Quadro 13 apresenta uma comparação entre as quatro tipologias de cenários irregulares estudados e os valores de radiação e Autonomia de Luz Natural Espacial obtidos. Nota-se que para os cenários que possuíam obstruções baixas (b) e (d), a quantidade de radiação obstruída é muito semelhante e os resultados para  $sDA_{200/50\%}$  são idênticos.

Quando analisamos os cenários (a) e (c), a única diferença em relação aos cenários citados anteriormente é a inexistência de obstrução baixa. Percebe-se que naquele em que a parcela desobstruída é frontal ao ambiente é possível atingir 100% de sua área com iluminâncias acima de 200 lux por mais de 50% das horas anuais.

Já no outro cenário (c), em que a parcela desobstruída é lateral, o percentual de área com as mesmas condições de iluminação cai para 72,2%, valor próximo ao obtido no cenário (d). Destaca-se que para os cenários citados, aquele que possui a parcela desobstruída na parte central (a) apresenta maior quantidade de radiação obstruída em relação ao cenário com parcela desobstruída na lateral (c). Com isso, a tendência seria que o cenário (a) apresentasse um valor menor de  $sDA_{200/50\%}$ . Entretanto, devido à forma como a radiação incide e se distribui no interior do ambiente permite que neste caso sejam obtidos valores superiores em relação ao cenário (c). Logo, se poderia pensar que este deveria ser o cenário que permitiria menores quantidades luminosas no interior do ambiente.

Quadro 13 - Comparação entre Valores de Radiação e Autonomia de Luz Natural

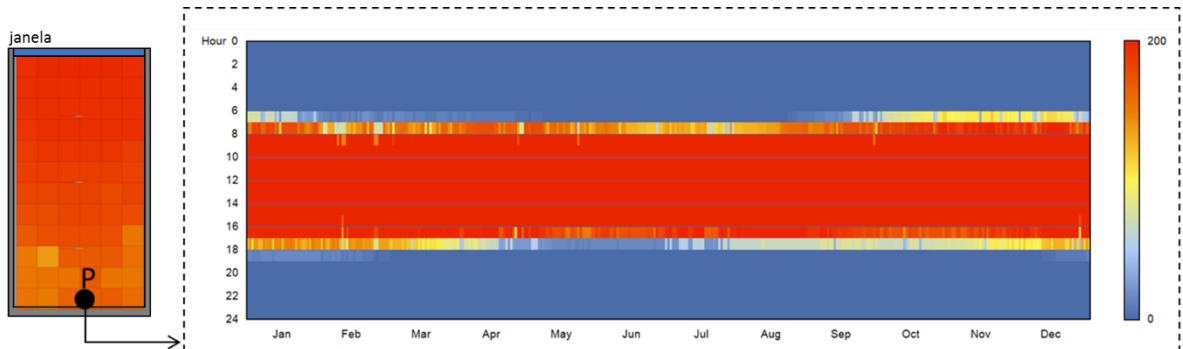
(a) LV_LE72_LD72	(b) OB_LE72_LD72	(c) LV_C72_LD72	(d) OB_C72_LD72
			
			
			
sDA <sub>200/50%</sub> = 100% Radiação Obstruída: 498,82 kWh/m <sup>2</sup>	sDA <sub>200/50%</sub> = 66,7% Radiação Obstruída: 567,58 kWh/m <sup>2</sup>	sDA <sub>200/50%</sub> = 72,2% Radiação Obstruída: 476, 86 kWh/m <sup>2</sup>	sDA <sub>200/50%</sub> = 66,7% Radiação Obstruída: 552,69 kwh/m <sup>2</sup>

Fonte: Autora (2020)

Buscando investigar este comportamento, foram realizadas análises para ambos os ambientes verificando em que momentos a iluminância de 200 lux era recebida ao longo no ano no ponto mais profundo do ambiente. A Figura 89 e 90 apresentam a esquerda o mapa de distribuição de autonomia de luz natural na malha de cálculo e a esquerda o gráfico com a distribuição das iluminâncias ao longo do ano no ponto P. No eixo vertical do gráfico estão localizadas as horas do dia e no eixo horizontal os meses do ano.

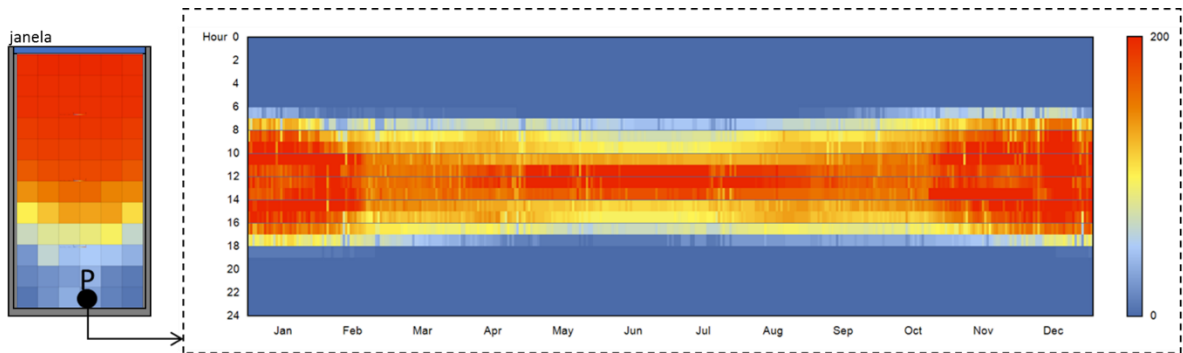
De acordo com os dados levantados, o ponto P para o cenário (a) atinge a iluminância de 200 lux em 100% das horas do ano. Já no cenário (c), o ponto P atinge o mesmo alvo por apenas 14% das horas do ano, sendo que os momentos mais prejudicados são no início da manhã e final tarde de abril a agosto e todas as horas do dia de fevereiro a abril e agosto a outubro. Pode-se perceber que no cenário em que a parcela central do céu está desobstruída permite que haja incidência perpendicular janela, o que permite que a parede do fundo do ambiente receba diretamente radiação do céu e sol e assim, garanta maiores quantidade luminosas ao fundo do ambiente.

Figura 89 - Distribuição de iluminâncias no ponto P ao longo do ano (a) (LV\_LE72\_LD72)



Fonte: Autora (2020)

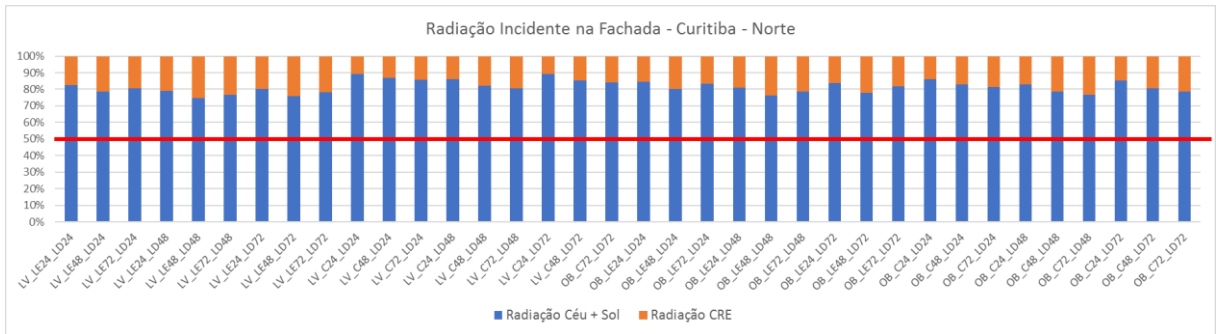
Figura 90 - Distribuição de iluminâncias no ponto P ao longo do ano (c) (LV\_C72\_LD72)



Fonte: Autora (2020)

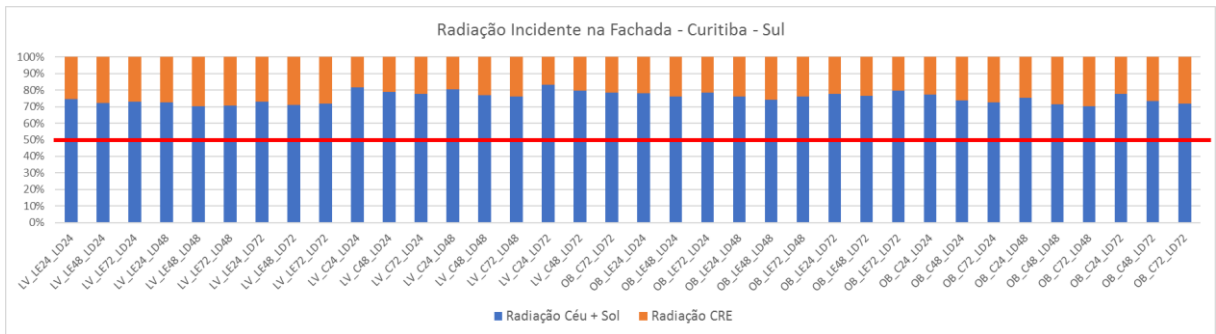
Assim como no tópico anterior, foi também analisada a quantidade de radiação recebida pela janela e desmembrada a parcela proveniente do céu e do sol (azul) e aquela proveniente da componente refletida externa (CRE – laranja). Os resultados são apresentados nas Figuras 91 a 102. Pode-se perceber que diferentemente do tópico anterior, para cenários irregulares não existe um padrão comportamental. Além disso, também se percebe que a CRE não tem uma influência tão significativa representando em média de 20% a 30% do total de radiação recebido pela janela. Os valores mais expressivos referentes à contribuição da CRE no total de radiação foram na fachada Oeste para Curitiba e Brasília e na fachada Sul para Brasília, ficando com valores superiores a 40% de contribuição em relação ao total. A variabilidade das alturas das obstruções permite uma maior visibilidade de céu e, assim, a contribuição da radiação proveniente do céu e sol apresenta uma contribuição maior em relação à CRE.

Figura 91 - Radiação Incidente na Janela - Curitiba - Norte



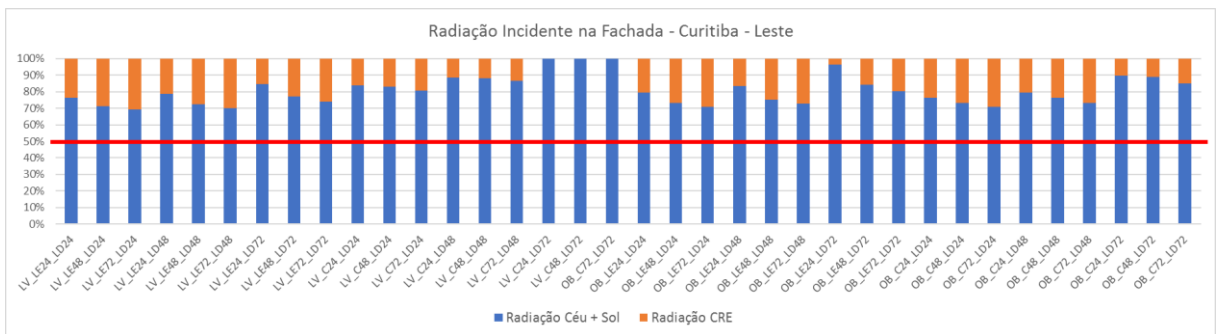
Fonte: Autora (2020)

Figura 92 - Radiação Incidente na Janela Curitiba Sul



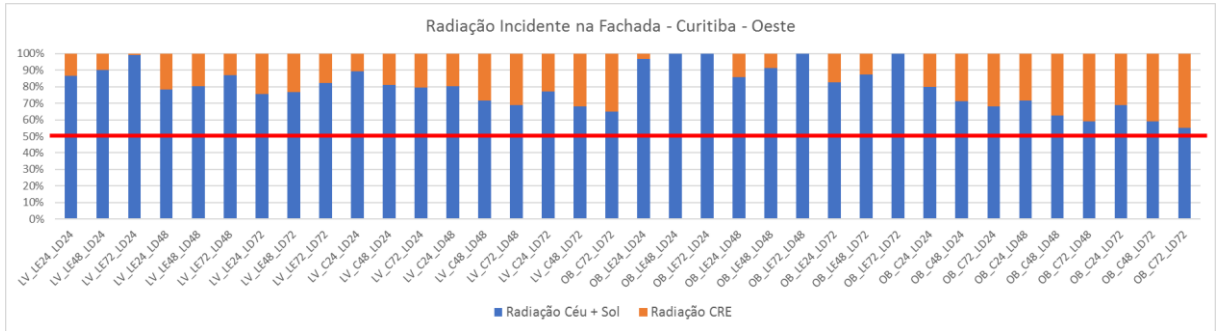
Fonte: Autora (2020)

Figura 93 - Radiação Incidente na Janela Curitiba Leste



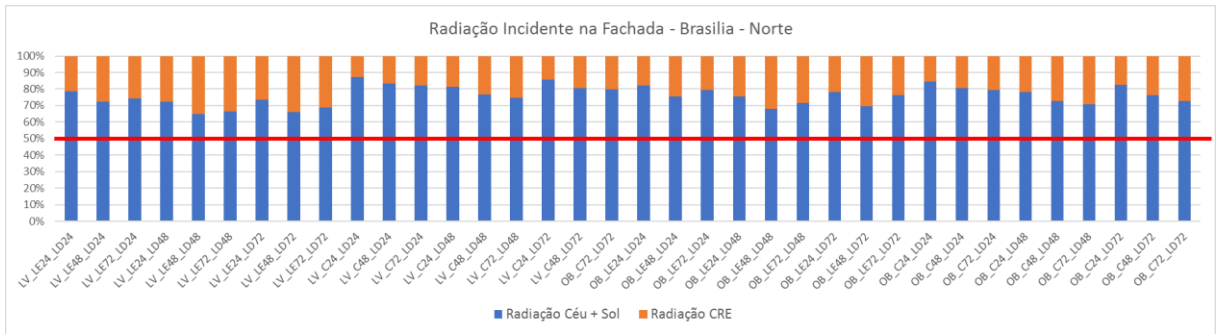
Fonte: Autora (2020)

Figura 94 - Radiação Incidente na Janela Curitiba Oeste



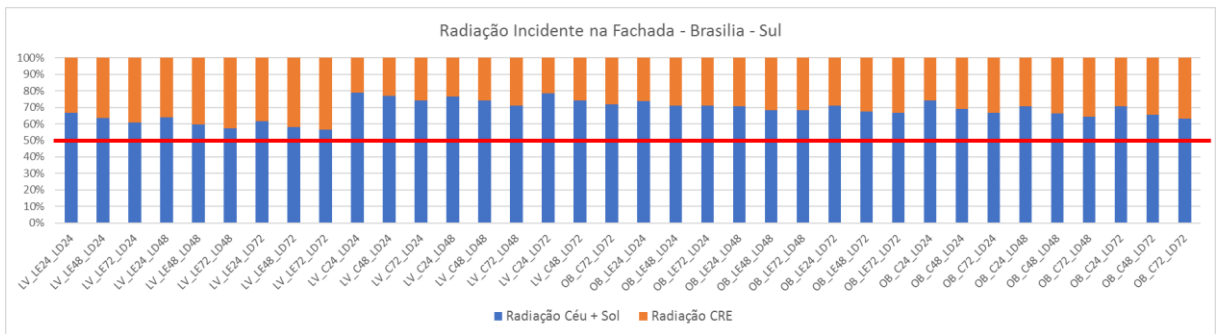
Fonte: Autora (2020)

Figura 95 - Radiação Incidente na Janela Brasília Norte



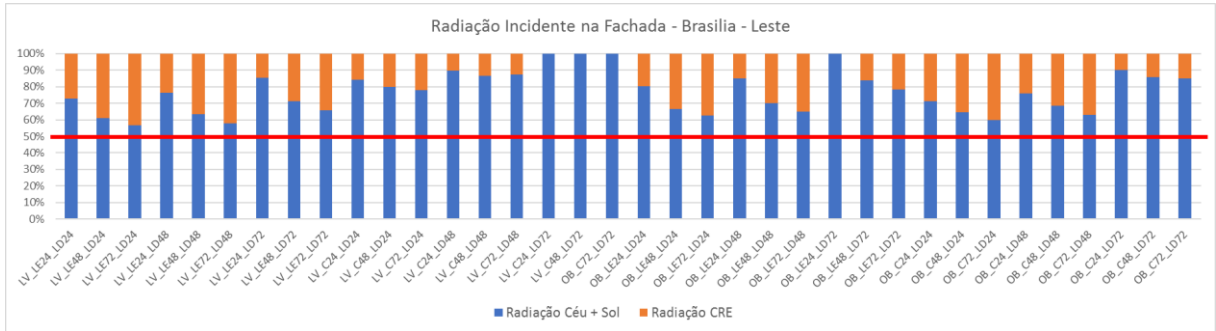
Fonte: Autora (2020)

Figura 96 - Radiação Incidente na Janela - Brasília Sul



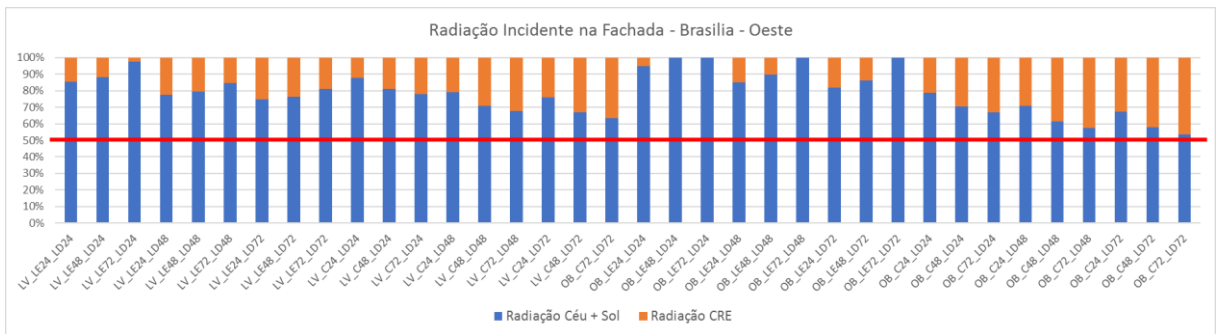
Fonte: Autora (2020)

Figura 97 - Radiação Incidente na Janela - Brasília Leste



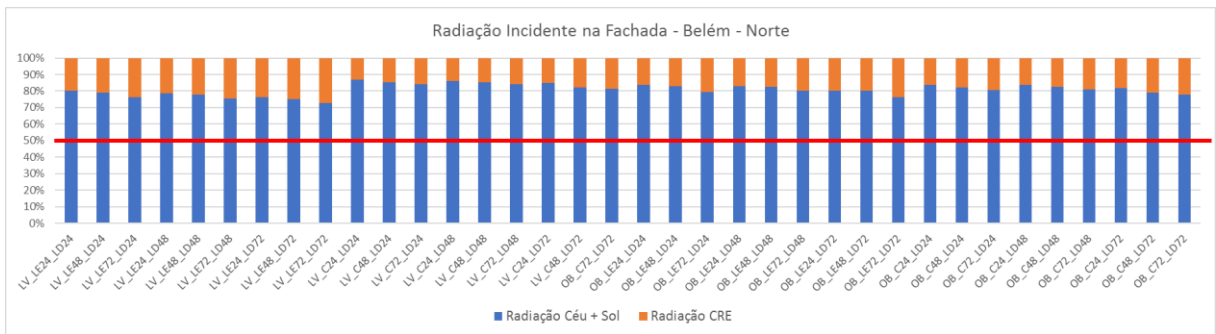
Fonte: Autora (2020)

Figura 98 - Radiação Incidente na Janela - Brasília Oeste



Fonte: Autora (2020)

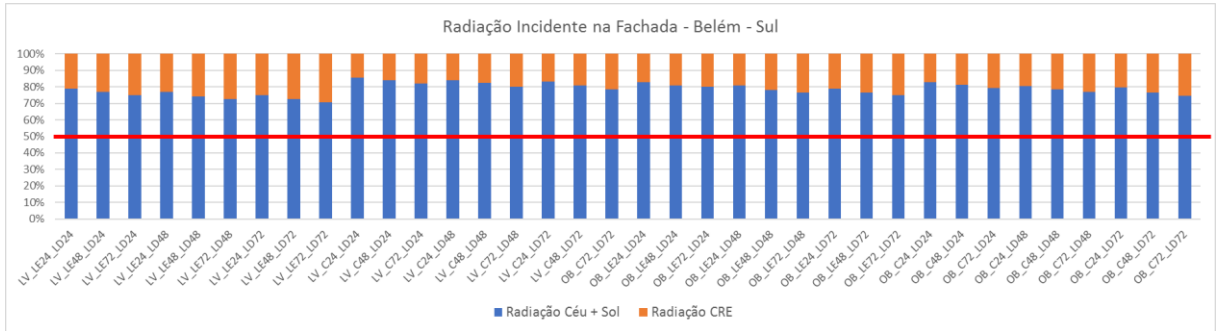
Figura 99 - Radiação Incidente na Janela - Belém Norte



Fonte: Autora (2020)

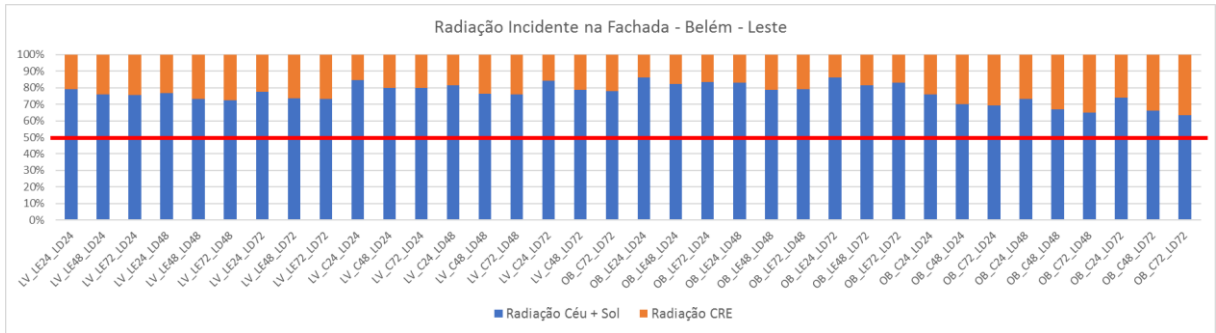


Figura 100 - Radiação Incidente na Janela Belém Sul



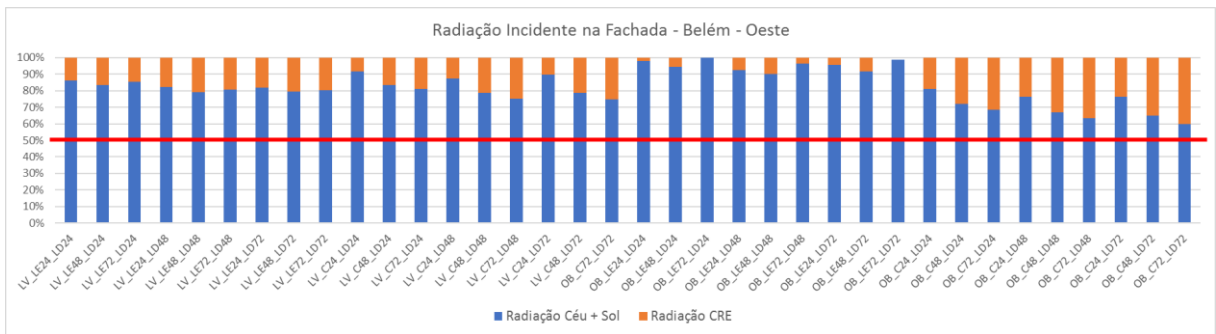
Fonte: Autora (2020)

Figura 101 - Radiação Incidente na Janela Belém Leste



Fonte: Autora (2020)

Figura 102 - Radiação Incidente na Janela Belém Oeste



Fonte: Autora (2020)

### **4.3.2 Influência da Refletância e dos Vazios Urbanos nos resultados de Autonomia de Luz Natural Espacial**

Os resultados apresentados neste capítulo analisam o quanto a variabilidade da geometria urbana pode influenciar no aumento de iluminação natural do ambiente interno em função da componente refletida externa (CRE).

No tópico 4.3.2.1 são apresentados, por meio de gráficos comparativos, os resultados de Autonomia de Luz Natural Espacial (sDA) para as variações de afastamento da obstrução contínua em relação ao objeto de análise que geram um vazio urbano entre si. Também são apresentados os resultados de Autonomia de Luz Natural ao longo do eixo central da malha no sentido da profundidade do ambiente para os mesmos cenários apresentados nos gráficos citados anteriormente. As primeiras buscaram identificar a quantidade de área do ambiente interno que é afetada e as segundas buscaram identificar a variabilidade no percentual de tempo que cada ponto atinge o valor de 200 lux em função da influência da CRE.

No tópico 4.3.2.2, também são apresentados os resultados de Autonomia de Luz Natural ao longo do eixo central da malha no sentido da profundidade. São comparados os cenários que consideraram uma redução da componente refletida externa (CRE), onde foi considerado um valor de refletância igual a 0,05 e  $ab = 1$ , em relação aos valores obtidos nas simulações que consideraram uma refletância média de 0,35 e  $ab = 5$ . Estas análises permitiram identificar a influência da CRE e dos diferentes espaçamentos entre edifícios no comportamento luminoso do ambiente interno.

#### **4.3.2.1 Resultados para Cenários com Obstrução Contínua**

As Figuras 103, 104 e 105 apresentam, conforme já foi mencionado no tópico 4.3, os valores de Autonomia da Luz Natural para 200 lux ao longo do eixo central da malha de cálculo no sentido de sua profundidade. Estão destacados em azul os casos de obstrução alta ( $72^\circ$ ) e em vermelho os casos de obstrução baixa ( $12^\circ$ ). Pode-se identificar que, para Curitiba e Brasília orientação Sul, obstruções altas ( $72^\circ$ ) afastadas 5 metros, o objeto de análise pode receber a iluminância de 200 lux por até o dobro do tempo se comparados a um cenário de mesmo ângulo de obstrução a 30 metros de distância. Acredita-se que este comportamento se explica em função do espalhamento da luz no ambiente externo. Com o distanciamento da edificação, há um maior volume de luz espalhada na atmosfera que acessa o ambiente interno. Além disso, a

proximidade entre as superfícies externas da obstrução e do objeto de análise e de ambas terem alturas semelhantes, no cenário de afastamento 5 metros gera uma energia maior proveniente das interreflexões entre as superfícies. Com isso, a luz é refletida ocorre de forma mais intensa e por um maior período. Já no cenário com a obstrução afastada 30 metros, se entende que, em função do espalhamento da luz, essa energia não tenha o mesmo potencial. No cenário de Curitiba na orientação Sul com afastamento de 5 metros e obstrução de ângulo vertical igual a  $72^\circ$ , o ponto localizado a 2 metros de profundidade recebe 200 lux por 61% das horas anuais. Em contrapartida, para uma obstrução de mesmo ângulo vertical afastada 30 metros esse valor é de apenas 31% das horas anuais. As orientações Leste e Oeste possuem a mesma tendência, entretanto, essa variação temporal não é tão alta quanto para a orientação Sul, em função da menor quantidade de radiação direta incidente na fachada da obstrução. Para orientação Norte, percebe-se que este comportamento não é tão significativo, visto que a fachada da orientação da obstrução, por ser Sul, recebe pouca intensidade de radiação direta. Para Belém, o comportamento difere das demais localidades, visto que as orientações Leste e Oeste recebem maior intensidade de radiação direta no plano vertical e as orientações Norte e Sul possuem predominância de radiação difusa. Assim, pode-se perceber que nas orientações solares Leste e Oeste em Belém existe uma tendência de comportamento semelhante à orientação Norte para Brasília e Curitiba. Já para as orientações Norte e Sul o comportamento é semelhante à orientação Sul de Brasília e Curitiba.

Para cenários de obstrução mais baixa ( $12^\circ$ ) ocorre o comportamento oposto. Obstruções afastadas 30 metros do objeto de análise permitem que um mesmo ponto receba a iluminância de 200 lux por 40% a mais de tempo se comparado à um cenário com obstrução afastada a 5 metros. Para o cenário de Curitiba na orientação Sul, um ponto localizado a 5 metros de profundidade no ambiente recebe 200 lux por apenas 11% do tempo em um cenário cuja obstrução está afastada 5 metros do objeto de análise. Porém, para este mesmo ponto em um cenário cuja obstrução está afastada 30 metros é possível atingir 200 lux por 51% do período analisado. Da mesma forma que nos cenários citados anteriormente, pode-se perceber uma tendência de aumento significativo na iluminação do ambiente interno no sentido de sua profundidade para as orientações que recebem maior intensidade de radiação direta na fachada da obstrução analisada.

Figura 103 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA<sub>200</sub>) no Eixo central do Ambiente - Curitiba

Cidade	Orientação Solar	Afastamento	Obstrução	0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA
CWB	NORTE	5m	Ang 12°	94	94	93	91	88	87	81	77	68	25	23	18	73.6
CWB	NORTE	5m	Ang 24°	94	94	92	89	85	76	67	47	24	11	4	2	58.3
CWB	NORTE	5m	Ang 36°	94	93	90	81	75	66	52	21	9	2	0	0	52.8
CWB	NORTE	5m	Ang 48°	94	91	84	76	64	47	21	6	1	0	0	0	41.7
CWB	NORTE	5m	Ang 60°	93	86	78	57	40	23	3	0	0	0	0	0	30.6
CWB	NORTE	5m	Ang 72°	90	81	56	32	18	1	0	0	0	0	0	0	22.2
CWB	NORTE	15m	Ang 12°	94	94	93	91	89	87	84	80	76	58	35	10	83.3
CWB	NORTE	15m	Ang 24°	94	94	92	90	87	80	73	64	45	15	6	3	66.7
CWB	NORTE	15m	Ang 36°	94	94	91	84	78	72	63	47	14	4	1	0	58.3
CWB	NORTE	15m	Ang 48°	94	92	85	78	70	54	39	13	1	0	0	0	47.2
CWB	NORTE	15m	Ang 60°	93	86	78	63	43	29	11	0	0	0	0	0	33.3
CWB	NORTE	15m	Ang 72°	88	69	42	26	14	3	0	0	0	0	0	0	16.7
CWB	NORTE	30m	Ang 12°	94	94	93	91	89	87	85	80	73	56	65	13	84.7
CWB	NORTE	30m	Ang 24°	94	94	93	90	87	79	73	65	50	19	10	2	70.8
CWB	NORTE	30m	Ang 36°	94	94	91	85	78	72	63	47	25	5	1	0	58.3
CWB	NORTE	30m	Ang 48°	94	92	85	78	70	56	41	21	3	0	0	0	47.2
CWB	NORTE	30m	Ang 60°	93	86	77	60	41	28	12	1	0	0	0	0	30.6
CWB	NORTE	30m	Ang 72°	89	64	38	24	14	4	0	0	0	0	0	0	16.7
CWB	SUL	5m	Ang 12°	94	94	93	91	88	86	81	71	50	11	8	7	68.1
CWB	SUL	5m	Ang 24°	94	94	92	89	85	74	63	39	18	8	4	2	58.3
CWB	SUL	5m	Ang 36°	94	93	90	82	76	67	51	26	14	5	3	1	52.8
CWB	SUL	5m	Ang 48°	94	91	85	79	72	59	39	21	11	5	2	1	50
CWB	SUL	5m	Ang 60°	93	87	82	74	64	47	27	15	7	4	1	1	41.7
CWB	SUL	5m	Ang 72°	90	83	75	61	45	28	16	9	4	1	0	0	33.3
CWB	SUL	15m	Ang 12°	94	94	93	91	89	87	84	79	73	56	39	29	84.7
CWB	SUL	15m	Ang 24°	94	94	92	90	87	80	74	66	52	33	25	24	70.8
CWB	SUL	15m	Ang 36°	94	94	91	84	80	75	67	56	37	23	19	13	63.9
CWB	SUL	15m	Ang 48°	94	92	85	81	76	67	55	38	23	14	10	9	55.6
CWB	SUL	15m	Ang 60°	93	86	80	72	62	49	33	19	10	6	3	4	43.1
CWB	SUL	15m	Ang 72°	89	74	59	44	29	16	8	3	1	0	0	0	25
CWB	SUL	30m	Ang 12°	94	94	93	91	89	87	84	78	69	51	60	29	83.3
CWB	SUL	30m	Ang 24°	94	94	93	90	87	80	74	65	54	30	27	16	70.8
CWB	SUL	30m	Ang 36°	94	94	91	85	80	75	67	54	36	18	14	13	65.3
CWB	SUL	30m	Ang 48°	94	92	85	81	75	65	52	33	16	8	4	5	54.2
CWB	SUL	30m	Ang 60°	93	86	80	68	55	39	23	10	3	1	0	0	38.9
CWB	SUL	30m	Ang 72°	89	73	49	31	19	8	3	1	0	0	0	0	16.7
CWB	LESTE	5m	Ang 12°	94	94	93	90	88	85	78	69	57	25	22	20	72.2
CWB	LESTE	5m	Ang 24°	94	94	91	88	83	71	62	46	28	14	8	4	58.3
CWB	LESTE	5m	Ang 36°	94	93	89	82	74	64	51	31	16	7	4	1	52.8
CWB	LESTE	5m	Ang 48°	94	91	86	78	68	52	33	17	9	3	1	1	45.8
CWB	LESTE	5m	Ang 60°	93	88	83	67	51	33	18	10	5	3	1	1	36.1
CWB	LESTE	5m	Ang 72°	90	86	69	47	30	17	11	7	3	1	1	0	25
CWB	LESTE	15m	Ang 12°	94	94	93	91	88	87	83	80	75	63	45	31	84.7
CWB	LESTE	15m	Ang 24°	94	94	92	90	87	82	77	70	55	33	21	19	70.8
CWB	LESTE	15m	Ang 36°	94	93	91	86	82	76	70	57	35	18	14	8	62.5
CWB	LESTE	15m	Ang 48°	94	92	87	82	75	66	53	33	17	10	8	6	52.8
CWB	LESTE	15m	Ang 60°	93	87	82	70	54	38	23	13	8	4	3	2	38.9
CWB	LESTE	15m	Ang 72°	88	73	50	33	20	11	6	4	2	1	1	0	19.4
CWB	LESTE	30m	Ang 12°	94	94	93	91	89	87	84	79	73	57	67	31	84.7
CWB	LESTE	30m	Ang 24°	94	94	92	90	87	82	77	71	57	33	25	14	70.8
CWB	LESTE	30m	Ang 36°	94	93	91	86	82	75	69	54	35	16	9	8	63.9
CWB	LESTE	30m	Ang 48°	94	92	87	80	72	63	49	31	13	5	3	4	50
CWB	LESTE	30m	Ang 60°	93	87	78	64	47	32	17	7	3	1	0	0	33.3
CWB	LESTE	30m	Ang 72°	89	64	40	25	14	7	2	0	0	0	0	0	16.7
CWB	OESTE	5m	Ang 12°	94	94	93	91	89	88	85	79	68	28	28	23	73.6
CWB	OESTE	5m	Ang 24°	94	94	92	90	87	77	67	49	28	13	5	2	59.7
CWB	OESTE	5m	Ang 36°	94	93	90	82	75	65	51	29	16	5	2	1	52.8
CWB	OESTE	5m	Ang 48°	94	92	82	75	65	52	34	17	9	3	2	1	45.8
CWB	OESTE	5m	Ang 60°	93	85	76	63	51	34	19	11	6	3	1	1	36.1
CWB	OESTE	5m	Ang 72°	89	78	64	43	30	18	11	7	4	1	1	0	25
CWB	OESTE	15m	Ang 12°	94	94	93	91	90	88	87	84	81	67	54	30	88.9
CWB	OESTE	15m	Ang 24°	94	94	93	90	88	82	74	67	53	31	20	19	70.8
CWB	OESTE	15m	Ang 36°	94	94	91	84	77	71	64	52	31	17	13	10	61.1
CWB	OESTE	15m	Ang 48°	94	92	83	77	70	59	47	31	16	10	9	6	50
CWB	OESTE	15m	Ang 60°	93	85	77	65	51	36	23	12	7	5	4	4	36.1
CWB	OESTE	15m	Ang 72°	88	68	49	32	22	12	8	4	2	1	0	0	18.1
CWB	OESTE	30m	Ang 12°	94	94	93	91	90	88	87	84	79	63	72	30	84.7
CWB	OESTE	30m	Ang 24°	94	94	93	90	88	81	74	68	55	32	23	14	70.8
CWB	OESTE	30m	Ang 36°	94	94	91	85	77	71	64	50	34	15	9	9	62.5
CWB	OESTE	30m	Ang 48°	94	92	83	77	69	60	46	30	13	6	4	5	50
CWB	OESTE	30m	Ang 60°	93	84	76	61	47	32	18	8	3	1	1	1	33.3
CWB	OESTE	30m	Ang 72°	89	65	41	25	15	6	2	0	0	0	0	0	16.7

Fonte: Autora (2020)

Figura 104 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA<sub>200</sub>) no Eixo central do Ambiente - Brasília

Cidade	Orientação Solar	Afastamento	Obstrução	0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA
BRA	NORTE	5m	Ang 12°	95	95	94	93	92	90	87	81	74	37	32	25	79.2
BRA	NORTE	5m	Ang 24°	95	95	93	92	89	82	77	64	42	24	14	5	65.3
BRA	NORTE	5m	Ang 36°	95	94	93	86	82	79	68	48	29	12	5	2	58.3
BRA	NORTE	5m	Ang 48°	95	93	88	83	78	66	48	27	9	2	1	1	50
BRA	NORTE	5m	Ang 60°	94	89	83	72	54	40	23	10	4	2	1	1	38.9
BRA	NORTE	5m	Ang 72°	92	85	64	45	31	18	9	5	2	1	1	1	25
BRA	NORTE	15m	Ang 12°	95	95	94	93	92	91	89	84	81	67	48	24	84.7
BRA	NORTE	15m	Ang 24°	95	95	93	93	91	84	82	75	61	36	18	8	72.2
BRA	NORTE	15m	Ang 36°	95	94	93	88	84	82	76	64	42	20	7	3	65.3
BRA	NORTE	15m	Ang 48°	95	93	88	84	79	72	60	41	20	5	3	2	58.3
BRA	NORTE	15m	Ang 60°	94	89	84	75	60	48	33	16	7	3	2	2	41.7
BRA	NORTE	15m	Ang 72°	92	78	57	42	30	18	11	6	3	2	1	1	22.2
BRA	NORTE	30m	Ang 12°	95	95	94	93	93	91	89	84	79	66	72	30	86.1
BRA	NORTE	30m	Ang 24°	95	95	93	93	91	84	82	77	66	42	29	6	75
BRA	NORTE	30m	Ang 36°	95	94	93	88	84	82	77	65	49	24	8	4	66.7
BRA	NORTE	30m	Ang 48°	95	93	89	84	79	72	62	46	23	7	3	3	58.3
BRA	NORTE	30m	Ang 60°	94	89	83	74	60	49	35	17	7	4	2	2	41.7
BRA	NORTE	30m	Ang 72°	92	76	53	41	30	20	11	6	3	2	2	1	22.2
BRA	SUL	5m	Ang 12°	95	95	94	93	92	90	86	81	72	28	21	21	73.6
BRA	SUL	5m	Ang 24°	95	95	93	92	89	82	77	64	42	25	14	12	65.3
BRA	SUL	5m	Ang 36°	95	94	93	87	83	79	70	50	35	20	9	6	61.1
BRA	SUL	5m	Ang 48°	95	93	89	85	79	73	60	43	29	19	12	9	58.3
BRA	SUL	5m	Ang 60°	94	90	86	80	74	64	45	34	23	13	7	6	50
BRA	SUL	5m	Ang 72°	92	85	80	68	58	44	32	23	15	9	2	3	41.7
BRA	SUL	15m	Ang 12°	95	95	94	93	93	92	88	84	81	67	51	41	88.9
BRA	SUL	15m	Ang 24°	95	95	93	93	91	85	81	76	63	46	37	37	75
BRA	SUL	15m	Ang 36°	95	94	93	89	85	81	78	68	51	37	32	27	70.8
BRA	SUL	15m	Ang 48°	95	93	89	86	81	77	68	53	38	28	21	20	63.9
BRA	SUL	15m	Ang 60°	94	90	86	80	73	63	47	33	23	15	12	10	50
BRA	SUL	15m	Ang 72°	92	80	68	57	46	34	22	14	8	4	3	2	31.9
BRA	SUL	30m	Ang 12°	95	95	94	93	93	92	88	83	80	63	69	41	84.7
BRA	SUL	30m	Ang 24°	95	95	93	93	91	85	81	77	66	45	42	32	76.4
BRA	SUL	30m	Ang 36°	95	94	93	90	85	81	78	68	53	36	27	28	70.8
BRA	SUL	30m	Ang 48°	95	93	89	86	81	77	69	54	36	24	18	18	63.9
BRA	SUL	30m	Ang 60°	94	90	86	78	71	59	45	28	16	9	6	4	50
BRA	SUL	30m	Ang 72°	92	82	66	51	37	23	14	8	5	3	2	2	27.8
BRA	LESTE	5m	Ang 12°	95	95	94	93	92	87	83	73	67	42	37	35	77.8
BRA	LESTE	5m	Ang 24°	95	94	93	92	86	77	71	61	49	32	24	16	66.7
BRA	LESTE	5m	Ang 36°	95	94	92	86	82	75	67	53	35	21	14	9	63.9
BRA	LESTE	5m	Ang 48°	95	93	91	85	77	65	51	38	21	13	10	8	52.8
BRA	LESTE	5m	Ang 60°	94	92	89	74	62	49	34	24	16	11	8	8	41.7
BRA	LESTE	5m	Ang 72°	93	81	73	60	48	31	23	16	11	8	6	6	33.3
BRA	LESTE	15m	Ang 12°	95	95	94	93	92	91	87	85	83	78	67	54	93.1
BRA	LESTE	15m	Ang 24°	95	95	93	93	91	87	85	83	76	58	44	41	80.6
BRA	LESTE	15m	Ang 36°	95	94	93	91	88	86	84	79	62	41	32	25	72.2
BRA	LESTE	15m	Ang 48°	95	93	92	89	82	76	69	54	35	25	20	17	62.5
BRA	LESTE	15m	Ang 60°	94	92	87	78	64	56	43	29	19	14	13	12	48.6
BRA	LESTE	15m	Ang 72°	92	79	60	48	36	25	16	12	7	6	4	4	25
BRA	LESTE	30m	Ang 12°	95	95	94	93	93	91	87	85	82	78	81	57	97.2
BRA	LESTE	30m	Ang 24°	95	95	93	93	91	87	85	83	79	60	51	35	83.3
BRA	LESTE	30m	Ang 36°	95	94	93	91	87	84	82	76	64	38	28	25	72.2
BRA	LESTE	30m	Ang 48°	95	93	91	86	80	71	66	54	31	20	12	13	62.5
BRA	LESTE	30m	Ang 60°	94	91	84	72	58	51	36	21	13	7	6	5	45.8
BRA	LESTE	30m	Ang 72°	92	71	49	39	28	19	11	6	4	3	3	2	16.7
BRA	OESTE	5m	Ang 12°	95	95	94	93	93	92	92	89	80	52	49	44	81.9
BRA	OESTE	5m	Ang 24°	95	95	93	93	92	85	80	68	47	36	25	16	66.7
BRA	OESTE	5m	Ang 36°	95	94	93	86	81	76	70	48	35	21	13	10	58.3
BRA	OESTE	5m	Ang 48°	95	93	85	79	72	67	53	33	24	14	9	9	54.2
BRA	OESTE	5m	Ang 60°	94	87	77	65	61	51	33	25	17	11	7	7	45.8
BRA	OESTE	5m	Ang 72°	92	80	64	53	46	33	21	16	10	7	5	5	31.9
BRA	OESTE	15m	Ang 12°	95	95	94	93	93	92	92	92	90	83	71	54	94.4
BRA	OESTE	15m	Ang 24°	95	95	94	93	92	87	82	79	71	54	44	38	80.6
BRA	OESTE	15m	Ang 36°	95	94	93	86	82	79	74	68	53	38	30	26	70.8
BRA	OESTE	15m	Ang 48°	95	93	86	80	73	69	60	50	33	24	20	18	61.1
BRA	OESTE	15m	Ang 60°	94	87	80	70	61	52	40	26	19	15	13	12	48.6
BRA	OESTE	15m	Ang 72°	91	74	59	46	39	28	16	10	7	4	3	3	25
BRA	OESTE	30m	Ang 12°	95	95	94	93	93	92	92	92	89	83	86	56	98.6
BRA	OESTE	30m	Ang 24°	95	95	94	93	92	87	82	79	74	58	50	36	81.9
BRA	OESTE	30m	Ang 36°	95	94	93	87	82	79	74	69	58	38	26	25	72.2
BRA	OESTE	30m	Ang 48°	95	93	86	80	73	71	60	51	32	20	15	13	61.1
BRA	OESTE	30m	Ang 60°	94	87	75	67	59	49	39	22	13	9	7	5	43.1
BRA	OESTE	30m	Ang 72°	92	71	51	37	32	18	9	4	2	2	2	1	22.2

Fonte: Autora (2020)

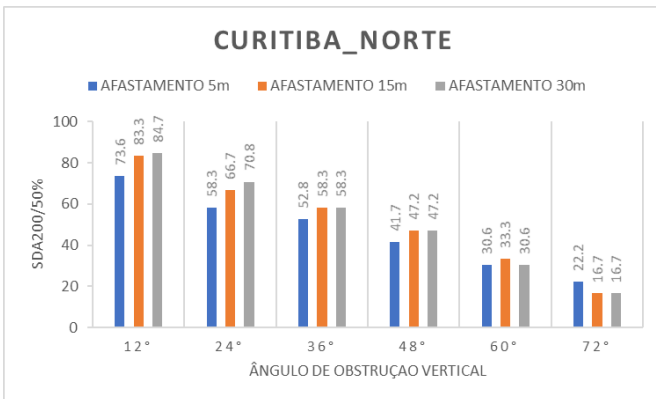
Figura 105 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA<sub>200</sub>) no Eixo central do Ambiente - Belém

Cidade	Orientação Solar	Afastamento	Obstrução	0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA
BEL	NORTE	5m	Ang 12°	96	96	94	91	90	89	87	80	69	30	22	17	75
BEL	NORTE	5m	Ang 24°	96	95	92	90	89	82	72	56	36	16	8	7	62,5
BEL	NORTE	5m	Ang 36°	96	94	91	87	82	75	62	43	26	11	7	3	58,3
BEL	NORTE	5m	Ang 48°	96	92	88	82	79	66	49	33	17	10	5	5	50
BEL	NORTE	5m	Ang 60°	94	89	84	79	67	49	32	18	11	7	3	3	41,7
BEL	NORTE	5m	Ang 72°	90	84	76	55	35	22	16	11	7	3	1	1	30,6
BEL	NORTE	15m	Ang 12°	96	96	94	92	91	89	88	85	79	61	38	19	83,3
BEL	NORTE	15m	Ang 24°	96	96	93	91	89	86	81	73	53	27	18	16	70,8
BEL	NORTE	15m	Ang 36°	96	95	92	88	84	81	75	61	34	17	12	9	65,3
BEL	NORTE	15m	Ang 48°	96	92	89	85	81	74	63	40	19	13	11	6	58,3
BEL	NORTE	15m	Ang 60°	94	89	83	79	71	58	39	19	11	7	3	4	50
BEL	NORTE	15m	Ang 72°	90	79	69	50	31	17	8	5	1	0	0	0	27,8
BEL	NORTE	30m	Ang 12°	96	96	94	92	91	89	88	85	78	61	69	20	84,7
BEL	NORTE	30m	Ang 24°	96	96	93	91	89	86	81	75	62	31	18	13	72,2
BEL	NORTE	30m	Ang 36°	96	95	92	89	84	81	76	64	41	15	9	10	66,7
BEL	NORTE	30m	Ang 48°	96	92	89	85	81	75	66	47	18	10	6	4	58,3
BEL	NORTE	30m	Ang 60°	95	89	83	79	71	58	39	17	8	3	1	0	47,2
BEL	NORTE	30m	Ang 72°	90	79	69	47	29	15	4	1	0	0	0	0	25
BEL	SUL	5m	Ang 12°	96	96	94	91	91	89	87	81	70	30	25	17	75
BEL	SUL	5m	Ang 24°	96	95	92	91	89	83	74	57	37	16	9	7	63,9
BEL	SUL	5m	Ang 36°	95	94	91	87	84	75	65	44	25	12	7	6	58,3
BEL	SUL	5m	Ang 48°	96	92	88	85	78	71	52	33	17	11	7	4	52,8
BEL	SUL	5m	Ang 60°	94	89	86	78	70	53	34	20	13	9	5	5	45,8
BEL	SUL	5m	Ang 72°	90	87	78	61	39	22	17	12	8	4	2	1	31,9
BEL	SUL	15m	Ang 12°	96	96	94	92	91	90	88	84	80	63	41	21	83,3
BEL	SUL	15m	Ang 24°	96	96	93	91	89	86	81	73	57	29	18	17	70,8
BEL	SUL	15m	Ang 36°	96	95	92	88	86	80	76	65	37	18	14	11	65,3
BEL	SUL	15m	Ang 48°	95	92	89	87	81	77	68	45	21	13	9	8	58,3
BEL	SUL	15m	Ang 60°	94	89	86	79	72	59	41	19	11	6	5	3	50
BEL	SUL	15m	Ang 72°	90	79	71	53	32	18	9	4	1	0	0	0	27,8
BEL	SUL	30m	Ang 12°	96	96	94	92	91	90	88	82	79	62	69	24	84,7
BEL	SUL	30m	Ang 24°	96	96	93	91	89	86	81	75	63	33	24	10	73,6
BEL	SUL	30m	Ang 36°	96	95	92	89	86	80	77	65	44	16	10	10	66,7
BEL	SUL	30m	Ang 48°	96	92	89	87	81	77	69	49	21	10	5	3	58,3
BEL	SUL	30m	Ang 60°	94	89	85	79	72	60	41	19	7	3	2	1	47,2
BEL	SUL	30m	Ang 72°	90	89	71	51	32	16	6	1	0	0	0	0	27,8
BEL	LESTE	5m	Ang 12°	96	96	93	91	89	88	82	71	67	37	32	28	75
BEL	LESTE	5m	Ang 24°	96	95	92	90	87	79	70	60	49	28	20	10	66,7
BEL	LESTE	5m	Ang 36°	95	94	90	88	80	77	65	53	37	16	8	4	63,9
BEL	LESTE	5m	Ang 48°	96	92	89	86	78	65	47	37	19	7	5	5	50
BEL	LESTE	5m	Ang 60°	94	90	88	73	63	46	28	22	12	6	5	4	41,7
BEL	LESTE	5m	Ang 72°	91	88	76	60	54	29	24	18	8	4	2	1	38,9
BEL	LESTE	15m	Ang 12°	96	96	94	91	91	89	88	87	82	77	65	50	93,1
BEL	LESTE	15m	Ang 24°	96	96	92	91	89	88	87	84	75	54	44	37	80,6
BEL	LESTE	15m	Ang 36°	96	95	91	89	88	88	84	79	61	39	27	22	72,2
BEL	LESTE	15m	Ang 48°	95	92	89	88	87	73	69	55	33	22	17	15	63,9
BEL	LESTE	15m	Ang 60°	94	89	88	78	65	56	40	27	18	10	7	7	50
BEL	LESTE	15m	Ang 72°	90	80	64	49	40	23	13	7	3	1	0	1	25
BEL	LESTE	30m	Ang 12°	96	96	94	92	91	89	88	87	81	78	80	53	94,4
BEL	LESTE	30m	Ang 24°	96	96	93	91	89	88	87	84	79	59	48	31	81,9
BEL	LESTE	30m	Ang 36°	95	95	91	89	88	86	82	77	66	36	19	19	73,6
BEL	LESTE	30m	Ang 48°	96	92	89	88	81	69	66	54	27	15	7	8	63,9
BEL	LESTE	30m	Ang 60°	94	89	84	73	59	49	35	16	8	2	1	0	41,7
BEL	LESTE	30m	Ang 72°	90	74	50	37	27	15	6	1	0	0	0	0	19,4
BEL	OESTE	5m	Ang 12°	96	96	94	92	91	91	90	88	77	52	49	47	81,9
BEL	OESTE	5m	Ang 24°	96	95	93	91	90	86	79	71	44	36	23	13	66,7
BEL	OESTE	5m	Ang 36°	96	94	91	88	79	78	72	45	31	20	12	5	58,3
BEL	OESTE	5m	Ang 48°	96	92	86	79	70	67	52	30	20	14	6	7	52,8
BEL	OESTE	5m	Ang 60°	94	89	79	68	59	49	30	20	16	12	5	5	41,7
BEL	OESTE	5m	Ang 72°	90	79	65	52	48	36	23	18	13	6	4	3	33,3
BEL	OESTE	15m	Ang 12°	96	96	95	92	91	91	90	89	88	87	70	52	93,1
BEL	OESTE	15m	Ang 24°	96	96	93	91	91	88	80	79	75	51	40	36	80,6
BEL	OESTE	15m	Ang 36°	96	95	92	88	79	79	73	68	49	33	28	24	66,7
BEL	OESTE	15m	Ang 48°	96	92	88	80	71	69	59	49	30	24	20	19	58,3
BEL	OESTE	15m	Ang 60°	94	89	80	69	61	51	41	24	19	12	10	8	47,2
BEL	OESTE	15m	Ang 72°	90	73	60	49	38	27	14	8	5	2	1	1	25
BEL	OESTE	30m	Ang 12°	96	96	95	92	91	91	90	89	88	87	87	55	98,6
BEL	OESTE	30m	Ang 24°	96	96	94	91	91	88	81	79	77	55	45	31	79,2
BEL	OESTE	30m	Ang 36°	96	95	92	89	79	79	74	68	58	34	26	23	70,8
BEL	OESTE	30m	Ang 48°	96	92	88	79	72	69	59	52	28	18	13	10	62,5
BEL	OESTE	30m	Ang 60°	95	89	79	69	60	48	37	20	8	4	2	2	41,7
BEL	OESTE	30m	Ang 72°	90	70	52	34	27	18	6	1	0	0	0	0	22,2

Fonte: Autora (2020)

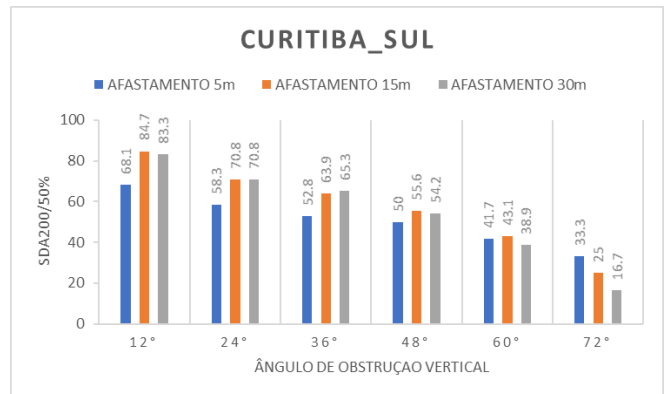
As Figuras 106 a 117 apresentam os gráficos comparativos de Autonomia de Luz Natural Espacial ( $sDA_{200/50\%}$ ) para todos os cenários estudados. Quando analisamos o cômputo final de Autonomia de Luz Natural Espacial, ou seja, a área que atinge 200 lux por mais de 50% das horas anuais, fica evidente o comportamento descrito anteriormente. Pode-se perceber que para obstruções mais baixas afastadas 5 metros do objeto de análise o ambiente interno atinge uma área iluminada menor se comparada ao cenário com a obstrução afastada a 30 metros. À medida que o ângulo de obstrução vertical aumenta o comportamento se inverte. Em cenários de obstrução mais alta é possível obter uma área iluminada maior considerando a obstrução afastada a 5 metros se comparada ao cenário de afastamento 30 metros. Esse fenômeno ocorre, pois, nos cenários de obstrução com ângulo vertical  $12^\circ$ ,  $24^\circ$  e  $36^\circ$  quando a mesma está afastada 5 metros a própria edificação do objeto de análise (que possui 15 metros de altura) impede que a radiação direta atinja o objeto de obstrução. Dessa forma, a fachada da obstrução recebe menor intensidade de radiação a ser refletida. Nos cenários de afastamento 30 metros a altura da obstrução supera a altura do objeto de análise, logo, permite que a obstrução receba uma quantidade significativamente maior a ser refletida, considerando que a refletância adotada foi de 35%. Já para os cenários de obstrução mais alta ( $60^\circ$  e  $72^\circ$ ), a altura da obstrução afastada 5 é semelhante à da edificação do objeto de análise, assim, as interreflexões entre as superfícies de ambas geram uma quantidade maior de radiação que acessa o ambiente interno. No cenário em que a obstrução está afastada 30 metros, acredita-se que, em função do espalhamento da luz, essa interação não ocorra de forma a gerar energia suficiente por um período maior.

Figura 106 - Comparação valores de sDA<sub>200/50%</sub> - Curitiba Norte



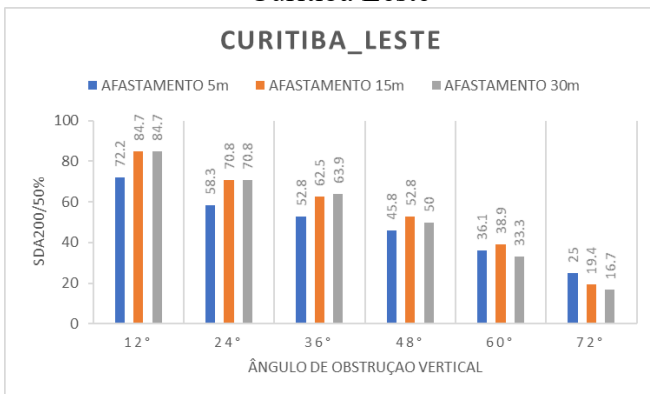
Fonte: Autora (2020)

Figura 107 - Comparação valores de sDA<sub>200/50%</sub> - Curitiba Sul



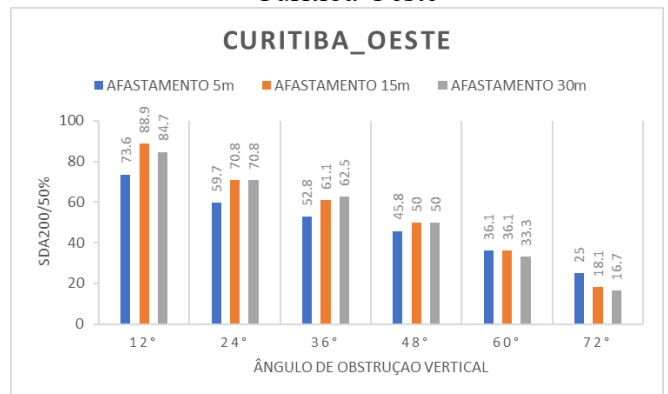
Fonte: Autora (2020)

Figura 108 - Comparação valores de sDA<sub>200/50%</sub> - Curitiba Leste



Fonte: Autora (2020)

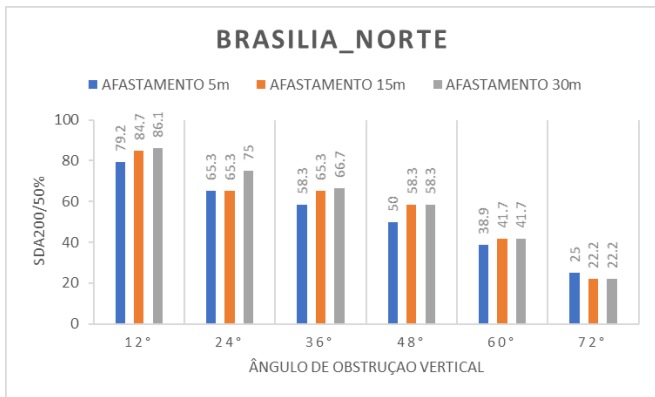
Figura 109 - Comparação valores de sDA<sub>200/50%</sub> - Curitiba Oeste



Fonte: Autora (2020)

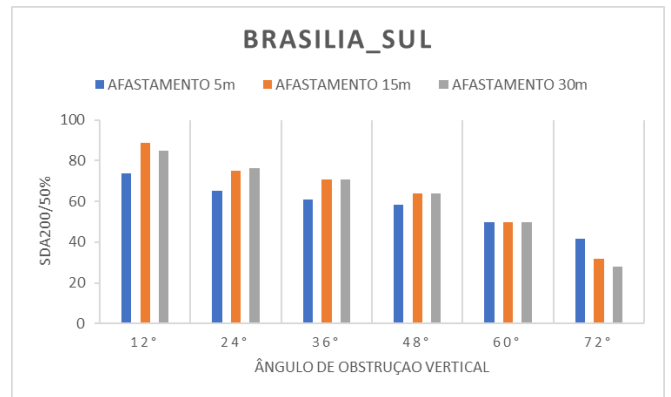


Figura 110 - Comparação valores de sDA200/50% - Brasília Norte



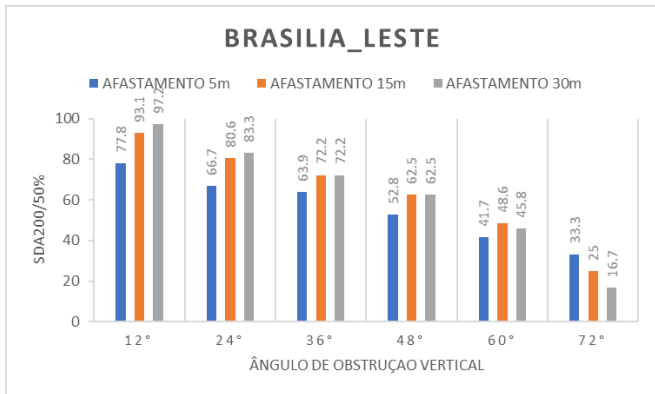
Fonte: Autora (2020)

Figura 111 - Comparação valores de sDA200/50% - Brasília Sul



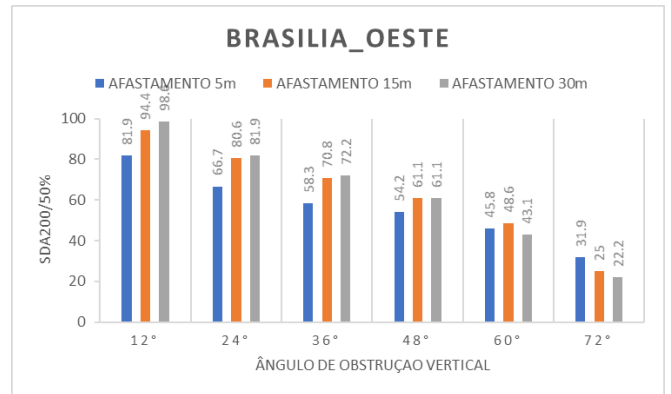
Fonte: Autora (2020)

Figura 112 - Comparação valores de sDA200/50% - Brasília Leste



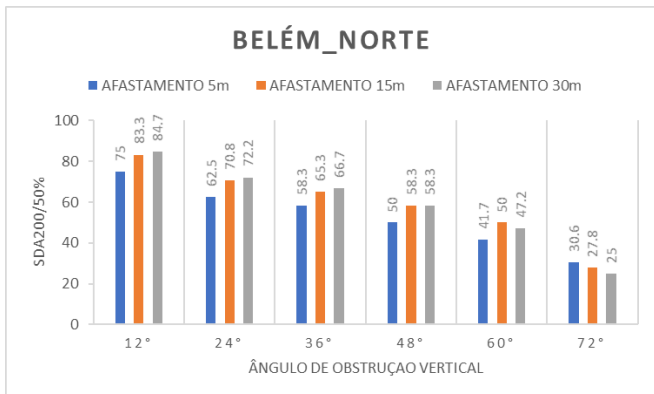
Fonte: Autora (2020)

Figura 113 - Comparação valores de sDA200/50% - Brasília Oeste



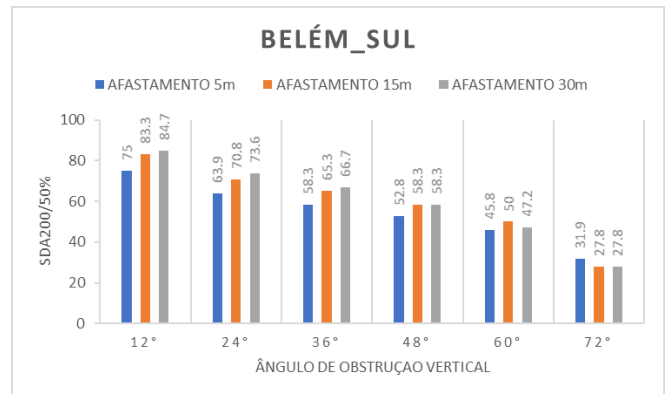
Fonte: Autora (2020)

Figura 114 - Comparação valores de sDA200/50%  
- Belém Norte



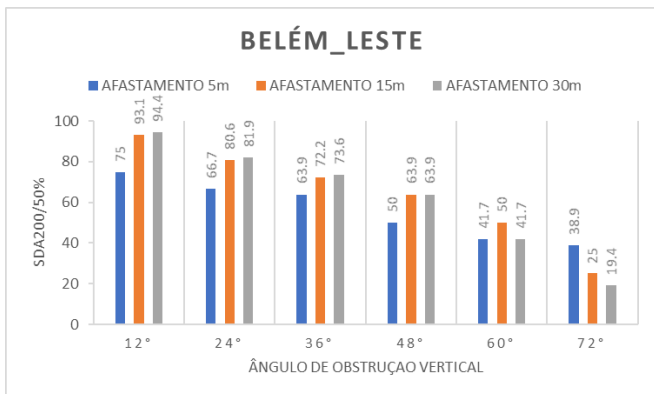
Fonte: Autora (2020)

Figura 115 - Comparação valores de sDA200/50%  
- Belém Sul



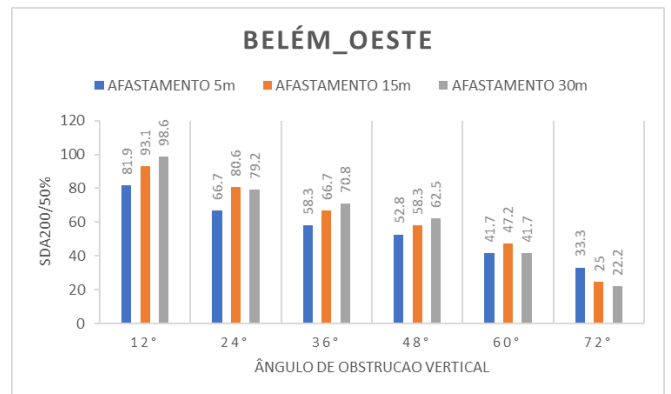
Fonte: Autora (2020)

Figura 116 - Comparação valores de sDA200/50%  
- Belém Leste



Fonte: Autora (2020)

Figura 117 - Comparação valores de sDA200/50%  
- Belém Oeste



Fonte: Autora (2020)

Os cenários analisados neste tópico mostram a relação do afastamento da obstrução com comportamento luminoso no interior do ambiente. Portanto não foram consideradas variações de altura a fim de mapear o impacto apenas dessa variável em cenários regulares.

#### 4.3.2.2 Resultados para Cenários com Obstruções Irregulares

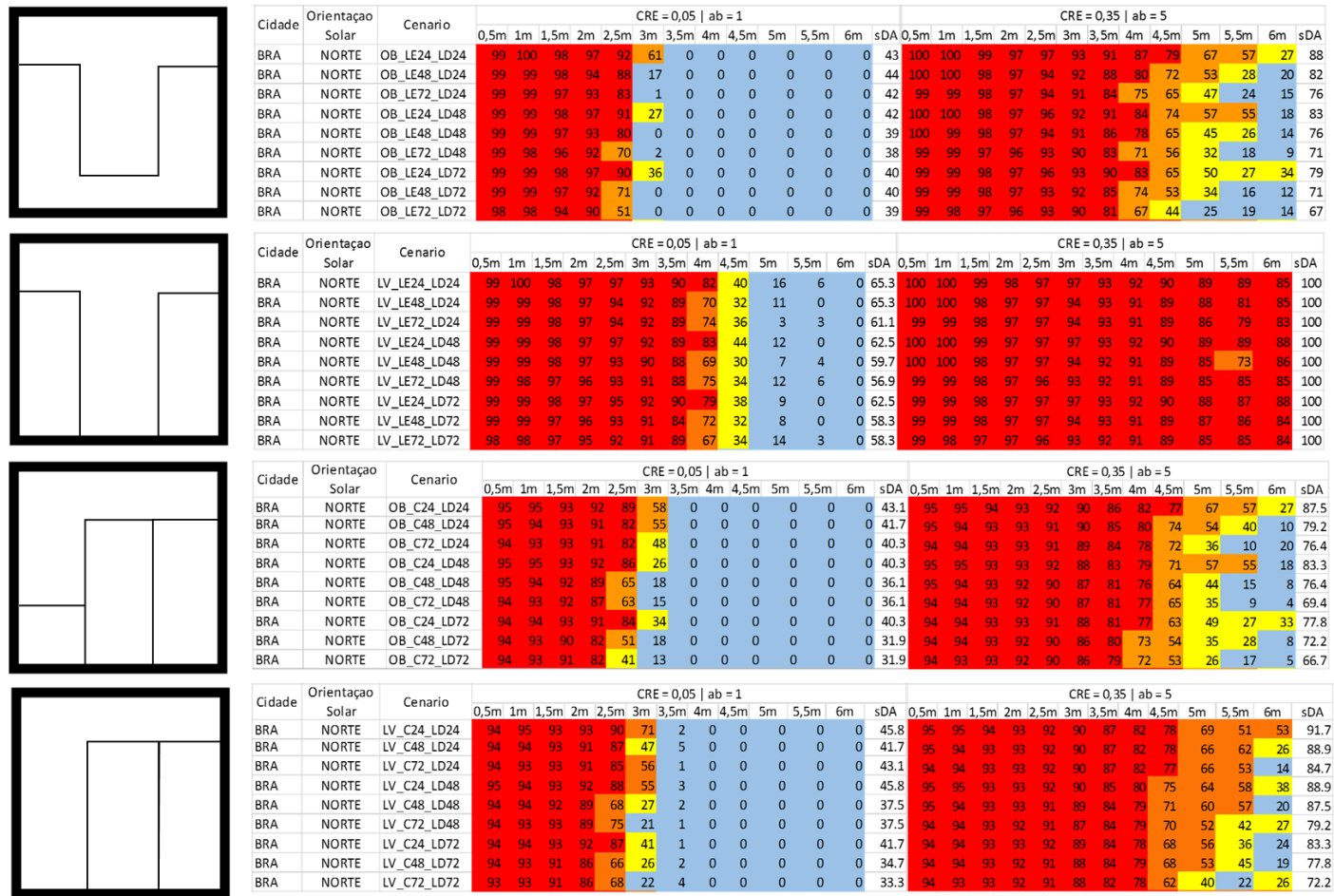
Neste tópico foram realizadas análises comparativas entre as simulações realizadas considerando a minimização da CRE a  $ab=1$  em relação às simulações que consideraram uma refletância média de 0,35 e um  $ab=5$ . Estas análises permitiram identificar o quando o aumento da visibilidade de céu, favorecida pela diferença de altura e vazios urbanos entre edifícios, permite que o ambiente interno seja iluminado.

No item 4.3.2.1 identificou-se que a radiação referente à CRE na fachada representa entre 10% a 20% em relação ao total de radiação recebida. Entretanto quando se analisa o ambiente interno percebe-se que a influência da CRE possui uma maior contribuição. O modo como a luz incide e se distribui no interior do ambiente faz com que haja um maior número de interreflexões entre as superfícies internas, garantindo quantidades luminosas generosas. Por exemplo, para um cenário de obstrução contínua com ângulo vertical de 72° para Brasília Norte o valor obtido de  $sDA_{200/50\%}$  é de 22,2%. Quando analisamos cenários irregulares com predominância de edificações altas, mas com espaços vazios (LV\_LE72\_LD72, OB\_LE72\_LD72, LV\_C72\_LD72 e OB\_C72\_LD72) é possível obter valores acima de 66,7% para o mesmo critério. Os espaços vazios existentes permitem que a luz incida no ambiente por meio de diversas direções. Isso faz com que os raios solares incidam em mais superfícies do ambiente se comparadas ao cenário de obstrução contínua, gerando um maior número de interreflexões e, assim, existe um ganho significativo de área iluminada.

O Anexo A apresenta, como foi descrito no tópico 4.3, os resultados obtidos para todos os cenários irregulares simulados. Considerando que todos os casos obtiveram um comportamento luminoso semelhante, independentemente da localidade ou orientação solar, será utilizado como base neste tópico a análise para Brasília orientação Norte. Na Figura 118, pode-se perceber que os cenários que consideraram a minimização do efeito da CRE permitem que o ambiente receba 200 lux por mais de 50% das horas de 2 a 2,5 metros no sentido da profundidade do ambiente. Apenas os cenários LV\_LE(ang)\_LD(ang) que, como foi apresentado no tópico 4.3.1.2, recebem maiores quantidades luminosas, a iluminação considerando esse mesmo critério atinge até 4 metros de profundidade do ambiente. Quando analisamos os cenários considerando uma refletância média de 0,35 para as superfícies externas, nota-se que sua contribuição permite que o ambiente atinja 200 lux por mais de 50% das horas de 5 a 6 metros de profundidade.



Figura 118 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA<sub>200</sub>) ao Longo do Eixo Central do Ambiente – Brasília Norte



Fonte: Autora (2020)



Entende-se que cenários com variabilidade de altura a CRE possuem um potencial significativo de desempenho de iluminação natural no ambiente interno. Logo, deve-se considerar que, para cenários urbanos que apresentem mais de uma obstrução com características diversas, a combinação da visibilidade de céu e do efeito da CRE pode gerar resultados semelhantes ao de obstruções contínuas de ângulo vertical mais baixo.

#### 4.4 DEFINIÇÃO DO PARÂMETRO PROPOSTO

O parâmetro proposto como ângulo de obstrução vertical representativo se caracteriza por ser uma média dos ângulos verticais de diversas obstruções ponderado pelo ângulo horizontal que estas apresentam quando medidas em planta. Entretanto, como pode-se perceber pelas etapas anteriores, fatores como a variação da distribuição da radiação no céu e a influência da CRE das superfícies de obstrução causam impacto significativo no desempenho de luz natural no ambiente interno. Sendo assim, o tópico 4.4.1 trata dos fatores de compensação para diferentes parcelas de céu definidos de acordo com a setorização proposta no tópico 3. No tópico 4.4.2 são apresentados os resultados obtidos utilizando-se o procedimento descrito com aplicação dos setores de compensação.

##### 4.4.1 Fatores de compensação e setorização da abóboda celeste

Com base nas etapas anteriores, pode-se identificar que existem parcelas de céu que possuem uma maior contribuição para a iluminação natural do ambiente interno em detrimento de outras. A proposta de setorização da abóboda celeste teve em vista compensar áreas de céu que representem mais ou menos potencial de iluminação. O fator de compensação representa uma diminuição ou aumento de uma parcela em comparação à outra em termos de quantidade de radiação. Como pode-se identificar no tópico 4.2, dependendo da localidade e da orientação solar o potencial de radiação incidente no plano vertical e a distribuição da mesma na abóboda celeste pode variar significativamente. Ainda, de acordo com os resultados apresentados no tópico 4.3, dependendo das características da geometria urbana, a forma como a radiação incide no ambiente e a influência da CRE na distribuição da iluminação natural pode gerar ganhos significativos de área iluminada.

Entende-se que devam existir fatores de compensação que busquem garantir um resultado mais próximo do que seria caracterizado como uma obstrução contínua, a qual possui um ângulo vertical único como parâmetro para caracterizar seu potencial de obstrução. Sendo assim, definiu-se um setor como referência para que fossem gerados os fatores de compensação com base no quanto os outros representam em relação a esse em termos de radiação. Como pode-se identificar no tópico 4.3.1.2, apesar de nem sempre o setor obstruído na parte central da abóboda celeste representar o maior potencial de radiação, a forma como ela incide no ambiente permite gerar iluminâncias mais altas e por maior período se comparados aos setores laterais. Por este motivo, utilizou-se o setor central como referência e aplicando-se o valor 1. Logo, os setores laterais representam o quanto de radiação a mais ou a menos em relação à esta parcela da abóboda celeste.

As Tabela 1, 2 e 3 apresentam os valores obtidos para cada orientação solar e localidade nos setores definidos.

Tabela 1 - Fatores de Compensação Curitiba

	<b>Curitiba</b>			
	<b>Norte</b>	<b>Sul</b>	<b>Leste</b>	<b>Oeste</b>
<b>Fh1v1</b>	1	1	1	1
<b>Fh2v1</b>	1,06	0,98	0,51	0,81
<b>Fh3v1</b>	1,14	0,96	0,84	0,47
<b>Fh1v2</b>	1	1	1	1
<b>Fh2v2</b>	0,83	0,86	0,37	0,72
<b>Fh3v2</b>	0,90	0,84	0,78	0,32
<b>Fh1v3</b>	1	1	1	1
<b>Fh2v3</b>	0,82	0,8	0,36	0,75
<b>Fh3v3</b>	0,87	0,79	0,80	0,33

Fonte: Autora (2020)



Tabela 2 - Fatores de Compensação Brasília

	<b>Brasília</b>			
	<b>Norte</b>	<b>Sul</b>	<b>Leste</b>	<b>Oeste</b>
<b>Fh1v1</b>	1	1	1	1
<b>Fh2v1</b>	1,15	1,01	0,45	0,67
<b>Fh3v1</b>	1,17	0,99	0,75	0,42
<b>Fh1v2</b>	1	1	1	1
<b>Fh2v2</b>	1,24	0,9	0,31	0,63
<b>Fh3v2</b>	1,23	0,9	0,73	0,28
<b>Fh1v3</b>	1	1	1	1
<b>Fh2v3</b>	1,04	0,93	0,34	0,66
<b>Fh3v3</b>	1,03	0,93	0,74	0,3

Fonte: Autora (2020)

Tabela 3 - Fatores de Compensação Belém

	<b>Belém</b>			
	<b>Norte</b>	<b>Sul</b>	<b>Leste</b>	<b>Oeste</b>
<b>Fh1v1</b>	1	1	1	1
<b>Fh2v1</b>	1,05	1,05	0,51	0,55
<b>Fh3v1</b>	1,07	1,02	0,57	0,49
<b>Fh1v2</b>	1	1	1	1
<b>Fh2v2</b>	0,87	1,01	0,45	0,48
<b>Fh3v2</b>	0,89	0,99	0,51	0,43
<b>Fh1v3</b>	1	1	1	1
<b>Fh2v3</b>	1,08	1,1	0,54	0,56
<b>Fh3v3</b>	1,09	1,08	0,60	0,50

Fonte: Autora (2020)

Além dos fatores de compensação referente a cada parcela da setorização proposta, deve-se considerar uma redução no ângulo em virtude da influência da CRE no ganho de iluminação no ambiente interno. A Tabela 4 apresenta os fatores de redução referentes à CRE.

Estes valores foram obtidos por meio da análise de radiação no tópico 4.3.1.2 para os cenários irregulares estudados. Utilizou-se os valores destes cenários visto que eles foram definidos com o intuito de obstruir cada parcela de céu definida pela setorização.

Tabela 4 - Fatores de Redução referentes à Componente Refletida Externa (CRE)

	<b>Curitiba</b>	<b>Brasília</b>	<b>Belém</b>
<b>Norte</b>	0,77	0,76	0,76
<b>Sul</b>	0,67	0,68	0,73
<b>Leste</b>	0,73	0,74	0,69
<b>Oeste</b>	0,68	0,66	0,75

Fonte: Autora (2020)

Com identificação destes fatores e a aplicação deles na fórmula proposta para definição do ângulo vertical de obstrução representativo é possível obter um resultado que esteja considerando as variáveis externas que possuem maior influência: a disponibilidade de radiação e a CRE.

#### **4.4.2 Aplicação do procedimento a cenários urbanos com obstruções irregulares**

A fórmula descrita no tópico 3.4.1.3 foi aplicada a todos os cenários urbanos irregulares estudados neste trabalho a fim de permitir uma análise comparativa com os resultados originais. O Anexo B apresenta todos os ângulos calculados para todos os cenários analisados. A Tabela 5 apresenta os resultados apenas para os cenários de Brasília visto que estes foram os resultados apresentados no tópico 4.3.2.1 e serão mencionados também no tópico 4.5 consideraram o cenário da cidade de Brasília para a Fachada Norte.

Tabela 5 - Definição do Ângulo Vertical Representativo

Brasília									
Bloco Lateral		Bloco Central		Bloco Lateral		Ângulo Representativo Calculado (°)			
Ang Hor	Ang Ver	Ang Hor	Ang Ver	Ang Hor	Ang Ver	Norte	Sul	Leste	Oeste
40	24			40	24	14	11	7	6
40	48			40	24	22	15	11	6
40	72			40	24	26	21	16	8
40	24			40	48	22	15	8	9
40	48			40	48	30	20	12	10
40	72			40	48	34	25	17	11
40	24			40	72	26	21	10	13
40	48			40	72	34	25	15	13
40	72			40	72	38	30	19	15
<hr/>									
40	24	40	24	40	24	20	16	13	11
40	48	40	24	40	24	28	21	17	12
40	72	40	24	40	24	32	26	22	14
40	24	40	24	40	48	28	21	14	14
40	48	40	24	40	48	36	25	18	15
40	72	40	24	40	48	40	30	23	17
40	24	40	24	40	72	32	26	16	18
40	48	40	24	40	72	40	30	21	19
40	72	40	24	40	72	44	36	25	21
<hr/>									
40	24	40	24			13	11	9	9
40	48	40	24			19	16	15	14
40	72	40	24			25	22	20	19
40	24	40	48			21	15	10	12
40	48	40	48			27	21	16	17
40	72	40	48			33	26	21	22
40	24	40	72			25	21	12	16
40	48	40	72			31	26	18	21
40	72	40	72			37	31	24	26
<hr/>									
40	24	40	24	40	24	20	16	13	11
40	48	40	24	40	24	26	22	19	16
40	72	40	24	40	24	32	27	25	22
40	24	40	48	40	24	28	21	14	14
40	48	40	48	40	24	34	26	20	19
40	72	40	48	40	24	40	32	26	25
40	24	40	72	40	24	32	26	16	18
40	48	40	72	40	24	38	31	22	23
40	72	40	72	40	24	44	37	28	29

Fonte: Autora (2020)

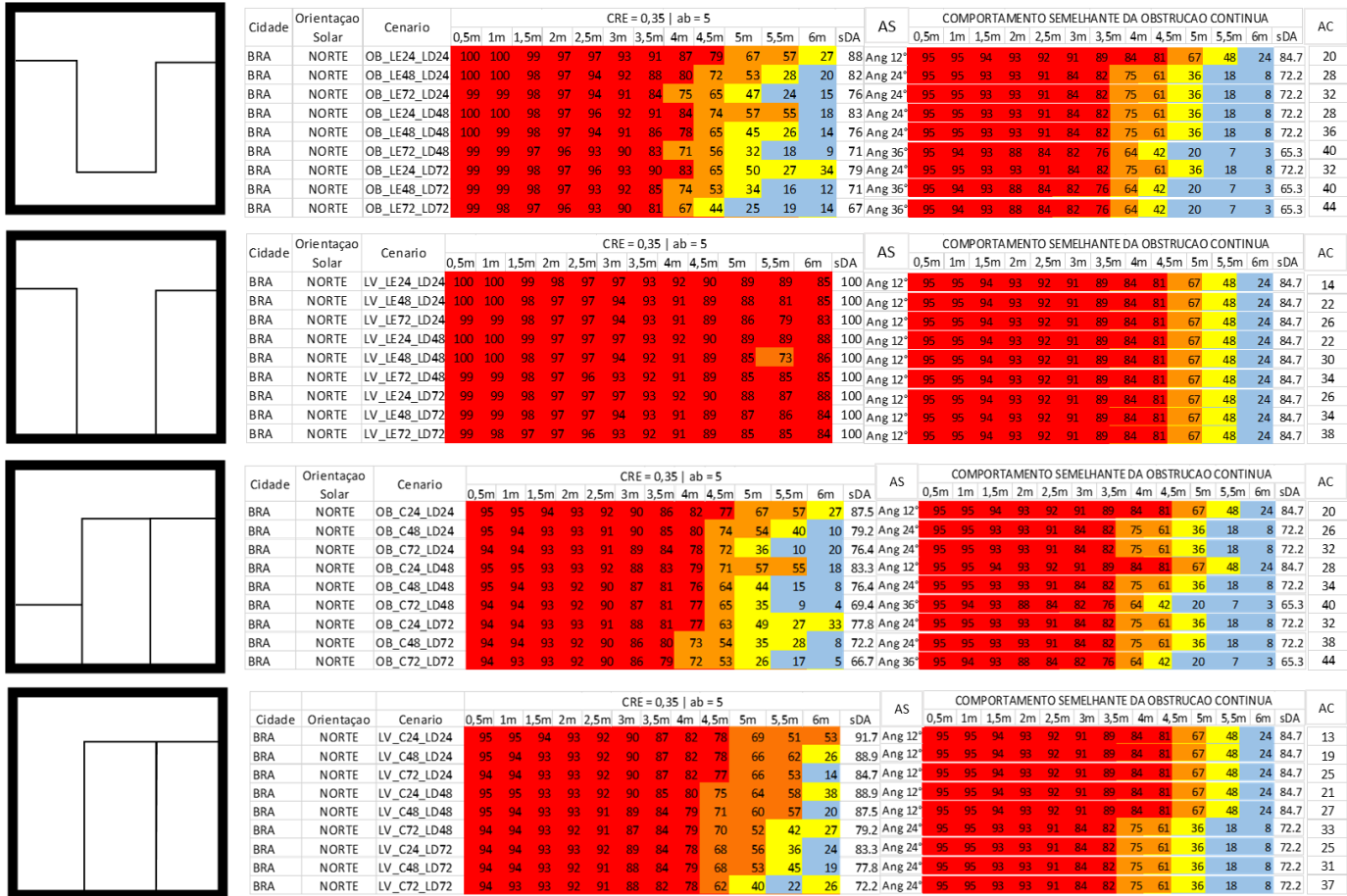
#### 4.5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Nesta etapa do trabalho buscou-se realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos cenários urbanos irregulares e o comportamento semelhante de uma obstrução contínua. Para a realização desta comparação utilizou-se a representação gráfica descrita no tópico 4.3 a fim de entender o comportamento de Autonomia de Luz Natural ao longo da malha de cálculo no sentido de sua profundidade e não apenas o resultado de  $sDA_{200/50\%}$ . Além disso, buscou-se verificar se o ângulo vertical representativo calculado apresentou um valor equivalente ou próximo ao comportamento semelhante analisado para a obstrução contínua quando comparada ao cenário irregular. A Figura 119 apresenta a comparação entre os valores obtidos para os cenários de Brasília Norte. Na primeira coluna da direita está representada um iconograma com a tipologia de linha do horizonte (*skyline*). Em seguida, apresenta-se o comportamento luminoso ao longo do eixo da malha de cálculo no sentido de sua profundidade do cenário original ao lado do cenário de obstrução contínua que possui comportamento semelhante. Por fim, na última coluna é apresentado o resultado obtido para o ângulo vertical representativo calculado para cada cenário. Estão identificados nas colunas como AS o ângulo de comportamento semelhante e AC o ângulo calculado por meio da fórmula descrita no tópico 4.2.2.

Pode-se perceber que, em geral, o comportamento luminoso no interior do ambiente de um cenário com obstruções irregulares é semelhante ao de uma obstrução contínua de baixo ângulo de obstrução vertical. Dentre os cenários apresentados na Figura 119 o ângulo mais alto obtido foi de  $36^\circ$  em cenários com duas obstruções com ângulo vertical de  $72^\circ$ . Quando verificamos o ângulo obtido por meio de cálculo, o valor obtido fica entre  $38^\circ$  e  $45^\circ$ . Entende-se que esta é uma forma simplificada e aproximada de entender o potencial de obstrução de cenários urbanos que possuem características irregulares. Acredita-se que existam limitações, principalmente, em função da forma como a luz incide no ambiente causando interreflexões internas que não foram consideradas na análise.



Figura 119 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente – Brasília Norte



Fonte: Autora (2020)



## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho com base nos resultados obtidos. O objetivo geral foi analisar a influência da geometria urbana e da visibilidade de céu quando são consideradas bases climáticas locais na análise de desempenho anual de iluminação natural.

Para atingir os objetivos específicos propostos o trabalho foi dividido em quatro etapas. Na primeira foi analisado o conceito de visibilidade de céu utilizando-se simulações computacionais do tipo *Climate Based Daylight Modelling* (CBDM), com base na proposta de pesquisas realizadas anteriormente. Na segunda etapa foi analisada a distribuição da radiação solar na abóboda celeste para diferentes localidades, bem como, o potencial de radiação que incide no plano vertical dependendo da orientação solar. Na terceira, foram realizadas simulações de iluminação natural do tipo *Climate Based Daylight Modelling* (CBDM) obstruindo diferentes parcelas de céu. Dessa forma buscou-se entender o comportamento da geometria urbana quando diferentes parcelas de radiação são obstruídas, bem como verificar o potencial da componente refletida externa (CRE) para iluminar o ambiente interno. Por fim, na quarta etapa, foi proposto um parâmetro representativo que pudesse caracterizar de forma simplificada o potencial de obstrução de diferentes edificações com características variadas. Entendeu-se que para cenários de obstrução contínua, o ângulo de obstrução vertical é o parâmetro de mais fácil identificação de qualquer obstrução externa. Sendo assim, foi proposto o desenvolvimento de um ângulo de obstrução vertical representativo, que se caracteriza por ser uma média de diversos ângulos verticais ponderados pelos seus respectivos ângulos horizontais medidos em planta baixa.

Os resultados utilizando simulações CBDM permitiram concluir que a presença da radiação direta no cálculo de iluminação natural gera um comportamento contrastante em relação às que consideram céu encoberto. Esse comportamento se dá, pois, a radiação direta permite um aumento significativo da área iluminada em função da radiação difusa resultante da reflexão da luz, gerada por meio das interreflexões no ambiente. De acordo com o estudo realizado utilizando-se a Janela de Céu Preferível, pode-se perceber que a energia que incide no ambiente quando são consideradas as componentes direta e difusa da luz permitem verificar comportamentos que quando se analisa o céu encoberto não ficam evidentes. Diferentemente do que acontece em simulações que consideram o céu encoberto, as simulações CBDM mostraram que energia proveniente da radiação direta que incide nas superfícies internas e se



reflete no ambiente gera quantidades luminosas que superam 200 lux apenas por meio da componente refletida. Além disso, pôde-se perceber que os ângulos definidos para uma visibilidade de céu preferível deixam de considerar uma parcela importante de contribuição da luz natural. O fato de considerar a base climática no cálculo de iluminação natural também influenciou nas variações de comportamento dependendo da localidade e orientação solar.

Quando se analisa a disponibilidade de radiação solar com base no arquivo climático e sua distribuição espacial na abóboda celeste pôde-se notar que a variabilidade entre localidades é significativa. Para Curitiba, por exemplo, pôde-se identificar que há a predominância de radiação difusa. Já para Brasília este comportamento não acontece. Essa variação acontece tanto em termos de quantidade de radiação direta e difusa como também entre orientações solares, quando é verificado o potencial de radiação incidente no plano vertical. Para Belém, por exemplo, as orientações solares Norte e Sul possuem predominância de radiação difusa enquanto para Leste e Oeste existe predominância de radiação direta. Com isso, pôde-se concluir que, a diferença de intensidade da radiação em função da sua distribuição espacial pode impactar de forma contrastante o comportamento da iluminação natural no interior do ambiente em cenários urbanos em que diferentes parcelas de céu são obstruídas. Um objeto que obstrui uma determinada parcela em Brasília na orientação Norte está bloqueando mais radiação direta se comparado a Curitiba para mesma orientação, e assim, gerando um comportamento luminoso distinto.

Não só a radiação que está sendo bloqueada pela obstrução, mas também a radiação refletida desta superfície impacta na distribuição da iluminação natural do ambiente interno. A radiação direta que incide na superfície externa da obstrução gera radiação difusa por meio da reflexão e essa, por sua vez, apresentou um aumento significativo na área iluminada do ambiente interno em análise. A componente refletida externa (CRE) é responsável por gerar iluminâncias acima de 200 lux por mais de 50% das horas com disponibilidade de luz natural em uma parcela razoável do ambiente. De acordo com os resultados obtidos para os cenários considerando obstruções contínuas esse aumento representa em torno de 30% da área no sentido da sua profundidade. Já para os cenários que consideraram obstruções irregulares esse aumento fica em torno de 40% da área do ambiente. Concluiu-se que quando mais distante uma edificação está obstruindo um determinado objeto, maior é a contribuição da CRE e dos vazios urbanos gerados por meio deste afastamento. Vale ressaltar uma exceção em que, para

obstruções mais altas (ângulo de obstrução 60° e 72°) um afastamento menor, porém entre edificações de alturas semelhantes permite uma maior troca de energia entre as superfícies. Assim, há uma maior quantidade de radiação difusa que acessa o ambiente interno ocorrendo um aumento na área iluminada do ambiente interno se comparado ao afastamento maior. Isso também se deve ao fato de que, quando a obstrução está mais afastada, além de refletir mais luz, ela também se espalha na atmosfera, o que acarreta uma perda de energia até incidir no ambiente interno.

Além disso, a existência de vazios entre edificações mostrou um impacto representativo no aumento de área iluminada do ambiente interno em cenários onde a parcela desobstruída está localizada na parcela frontal ao ambiente em análise. Nestes casos, notou-se que não necessariamente a parcela em frente ao objeto de análise é aquela que possui maior contribuição em termos de radiação. Entretanto, a forma como ela incide no ambiente, ou seja, os raios perpendiculares à janela permitem que haja interreflexões internas que geram iluminâncias de 200 lux por quase 100% do tempo e em 100% da área. A radiação incidente perpendicular à janela permite que, principalmente, o fundo do ambiente seja iluminado por um período maior. Este fenômeno ocorreu em todos os casos analisados. Ainda, verificou-se que a existência de espaços vazios permitiu que os cenários obtivessem valores de  $sDA_{200/50\%}$  semelhantes, tanto cenários que apresentam predominância de obstruções baixas quanto altas. As variações de alturas atreladas aos vazios urbanos permitiram ganhos expressivos de iluminação no ambiente interno, mesmo em casos com predominância de obstruções de ângulo vertical mais alto (72°).

Essa conclusão vai de encontro aos resultados do estudo de Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019) com relação às tipologias de quadra arranha-céus, as quais obtiveram resultados elevados de iluminação natural mesmo em cenários de alto índice de aproveitamento. Os autores mostram que para esta tipologia conforme aumenta-se o valor dos índices de aproveitamento, os valores de  $sDA_{300/50\%}$  apresentam-se quase constantes. No estudo de Zandavali (2018), os cenários de tipologia rua e pavilhão apresentaram uma redução pouco expressiva nos valores de  $sDA_{300/50\%}$  considerando um aumento no índice de aproveitamento de 1,3 para 3,0 se comparados à tipologia de miolo de quadra. Em ambos os trabalhos, para o cenário de miolo de quadra, as taxas de ocupação permaneceram as mesmas mesmo se aumentando as alturas por meio do índice de aproveitamento. Com isso, em função desta ser uma tipologia de laterais fechadas, gera um comportamento semelhante ao de uma obstrução contínua, como foi estudado nesta pesquisa. Já as tipologias de arranha céus e pavilhão

apresentaram um número maior de interstícios entre edificações, gerando uma maior quantidade de vazios urbanos, semelhante aos cenários irregulares estudados neste trabalho. Logo, pode-se perceber que quanto maior é a quantidade de vazios urbanos gerada por meio de baixas taxas de ocupação, menor é o impacto da altura da obstrução. Ainda, no estudo desenvolvido por Saratsis, Dogan e Reinhart (2016), os resultados mostraram que a tipologia urbana perimetral, que se caracteriza por uma menor taxa de ocupação e maior altura, foi a que apresentou os melhores resultados para  $sDA_{300/50\%}$ .

O adensamento urbano por meio da verticalização pode contribuir para o acesso à iluminação natural quando exista uma parcela razoável de vazios urbanos. Para cenários com predominância de edificações altas, mas com existência de vazios urbanos o comportamento resultante da iluminação natural no ambiente interno se assemelha ao de cenários de obstrução contínua de altura mais baixa. Com isso, conclui-se que o ângulo vertical de obstrução destes cenários, por mais alta que seja a edificação, pode não representar de fato o potencial de obstrução sobre um determinado ambiente caso haja uma parcela considerável de vazios urbanos.

Entende-se que contemplar um método simplificado que identifique uma possível equivalência entre ângulos de obstrução vertical permite entender o potencial de obstrução de cenários urbanos irregulares no desempenho luminoso anual. Dessa forma, essa se torna uma ferramenta útil para garantir uma boa qualidade de iluminação na tomada de decisão em fases iniciais de projeto. Com os resultados da presente pesquisa foi possível desenvolver fatores de compensação que refletem de forma quantitativa o potencial de radiação de diferentes parcelas de céu com base em dados climáticos. Estes fatores permitem reduzir ou aumentar o ângulo vertical de obstrução com base no posicionamento das obstruções externas em relação ao objeto de análise. Assim, é possível verificar a equivalência de um contexto urbano com múltiplas obstruções por meio de um único valor de ângulo de obstrução vertical.

Os objetivos propostos permitiram entender melhor o comportamento da luz natural no ambiente interno em diferentes situações de obstrução. A influência das condições climáticas de cada localidade e orientação solar permitiu analisar de que forma o posicionamento das obstruções, a reflexão das superfícies externas e a existência de vazios urbanos pode gerar ganhos de iluminação natural no ambiente interno. A variabilidade de alturas entre edificações pode gerar maior visibilidade céu e apresentar um comportamento semelhante ao de uma

obstrução mais baixa que não possua descontinuidades. A geometria urbana é um dos aspectos de maior impacto no desempenho lumínico dos ambientes internos. O entendimento do comportamento da luz natural no ambiente interno em função de diferentes obstruções de forma simplificada permite uma análise mais assertiva ainda em fases iniciais de projeto. Com isso, é possível que as tomadas de decisões possam ser realizadas sem comprometer a qualidade da iluminação natural.

### 5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A pesquisa apresenta duas principais limitações. Ambas são referentes aos cenários estudados com obstruções irregulares no tópico 3.3. A primeira se trata da decisão por não variar os afastamentos laterais entre as obstruções, mantendo sempre o ângulo horizontal de 40° ou totalmente obstruído ou totalmente livre. Optou-se por este recorte visto que o principal objetivo da definição destes cenários foi obstruir os ângulos definidos na setorização da abóboda celeste que deram origem aos fatores de compensação.

A outra limitação é referente à decisão de não variar as alturas ou manter como espaços vazios os lotes da lateral direita. Essa definição se deu em função dos resultados obtidos no tópico 4.2. Pôde-se identificar que a distribuição da radiação na abóboda celeste para os arquivos climáticos selecionados apresenta intensidades semelhantes para leste e oeste, ou seja, são quase simétricos. Assim, acredita-se que os resultados para a lateral direita seriam semelhantes aos obtidos para a lateral esquerda. Sendo assim, optou-se por gerar variações de cenários urbanos irregulares somente em um dos lotes laterais e aquele frontal.

### 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na investigação conduzida neste trabalho e nos resultados obtidos, sugere-se como trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Verificar o impacto de outras variações de cenários urbanos mesclando diferentes afastamentos com variações de altura;
- Analisar a influência do aumento de CRE com eventuais prejuízos no conforto visual relacionados a ofuscamento;

- Analisar o potencial de ganho de iluminação no ambiente interno e probabilidade de ofuscamento considerando contextos urbanos com muitos planos de vidros reflexivos

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.
- BRASÍLIA, **Código de Obras e Edificações do Distrito Federal – COE**, 2017
- BROWN, G. Z. e MARK DeKay. **Sun, Wind & Light. Architectural Design Strategies**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001
- CAPELUTO, I. G. The influence of the urban environment on the availability of daylighting in office buildings in Israel. **Building and Environment**, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 745–752, 2003.
- CHATZIPOULKA, C. et al. Sky view factor as predictor of solar availability on building façades. **Solar Energy**, [s. l.], v. 170, n. February, p. 1026–1038, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.028>
- CHENG, V.; STEEMERS, K.; MONTAVON M.; COMPAGNON, R., Compact cities in a sustainable manner, **2nd International Solar Cities Congress** - Oxford, 2006
- CONDOM, G. B. C. B. **GUIA RÁPIDO GBC Brasil**. [s. l.], 2017.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. prEN 17037:2018 – **Daylight of buildings. European Standards**. CEN/TC 169. Date: May 2018, ICS 91.160.01, 2018
- HAMZAH, B.; LAU, S. Y., The development of visible sky area as an alternative daylight assessment method for high rise buildings in high-density urban environments, **Architectural Science Review**, 59:3, p. 178-189, 2014
- ILUMINATING ENGINEERING SOCIETY. Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE) – LM-83-12. **Illuminating Engineering Society of North America**. Nova Iorque. 2012.
- LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>> Acesso em: dezembro de 2018.
- LEDER, S.M. **Ocupação Urbana e Luz Natural: Proposta de Parâmetro de Controle da Obstrução do Céu para Garantia de Disponibilidade de Luz Natural**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2007
- LEED Leadership in Energy and Environmental Design – Green Building Rating System Disponível em <<http://www.usgbc.org/leed>> Acessado em abril de 2019
- LITTLEFAIR, P. Site Layout Planning for Daylight and Sunlight: A Guide to Good Practice. Garston: Building Research Establishment Report, 1991. 60p

MARDALJEVIC, J.; CHRISTOFFERSEN, J., 'Climate connectivity' in the daylight factor basis of building standards. **Building and Environment**, v. 113, p. 200-209, 2017.

MARDALJEVIC, J. Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. **Lighting Research and Technology**, v. 32, n. 2, 2000. 7 p.

MARDALJEVIC, J.; HESCHONG, L.; LEE, E., Daylight metrics and energy savings, **Lighting Research and Technology**, v.41 p. 261–283, 2009

NATANIAN, J.; ALEKSANDROWICZ, O.; AUER, T. A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts. **Applied Energy**, [s. l.], 2019.

NEUMAN, Michael. The compact city fallacy. **Journal of Planning Education and Research**, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 11–26, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0739456X04270466>

OLINA, A.; ZAIMI, N., **Daylight Prediction Based on VSC -DF relation - A Guide for Daylighting in Urban Planning**, Mestrado em Eficiência Energética e Edifícios Ambientais, Faculdade de Engenharia, Universidade de Lund

PEREIRA, F. O. R.; FONSECA, R. W.; SCALCO, V.A., Considerações sobre a avaliação do desempenho da iluminação natural através da ABNT NBR 15575/2013. **Lumière Electric**, São Paulo, p. 50 - 52, 01 abr. 2017.

PEREIRA, F. O. R., LEDER, S. M., Ocupação Urbana e Disponibilidade de Luz Natural, **Pesquisa e Tecnologia Minerva**, v. 5(2), p. 129-138, 2008

PEREZ, R. et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, [s. l.], v. 44, n. 5, p. 271–289, 1990.

PREFEITURA DE CURITIBA. Lei Nº 11.095. [s. l.], p. 1–85, 2004.

RITCHIE, A.; THOMAS, R., **Sustainable Urban Design: An Environmental Approach**, Taylor & Francis Group, 2nd Edition, London & New York, 2009

SÃO PAULO, **Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado/PDDI- Lei nº 7.688/71**, 1972

SÃO PAULO, **Secretaria Municipal do Planejamento**. Disponível em <<http://www.prodiam.sp.gov.br/sempla/zone.htm>> Acessado em maio de 2019

SARATSI, E.; DOGAN, T.; REINHART, C. F., Simulation-based daylighting analysis procedure for developing urban zoning rules, **Building Research & Information**, v. 45:5, p. 478-491, 2016

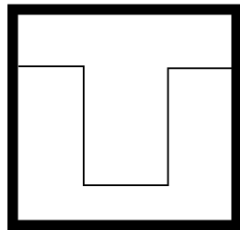
- SCALCO, V. A.; PEREIRA, F. O. R. Método para a avaliação do impacto de edificações no acesso à iluminação natural em vizinhanças urbanas aplicado em cenários virtuais. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 169–187, 2016.
- SOLEMMA LCC, 2014. DIVA-FOR-GRASSHOPPER. Disponível em <<https://www.solemma.com/>> Acessado em novembro de 2018
- STRØMANN-ANDERSENA, J.; SATTRUPB, P.A., The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains, **Energy and Buildings**, v. 43, p. 2011–2020, 2011
- TREGENZA, P.; J MARDALJEVIC J., Daylighting buildings: Standards and the needs of the designer, **Lighting Research and Technology**, Vol. 50: 63–79, 2018
- TREGENZA, P. R.; WATERS, I. M. Daylight coefficients. **Lighting Research & Technology**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 65–71, 1983.
- ZANDAVALI, B. A.; TURKIENICZ, B. Cellular automata: Bridge between building variability and urban form control. **Simulation Series**, [s. l.], v. 50, n. 7, p. 182–189, 2018.



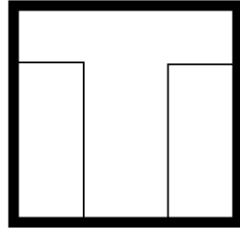
## **ANEXO A – Distribuição dos valores de Autonomia de Luz Natural (DA<sub>200</sub>) ao longo do Eixo Central do Ambiente – Comparação entre Cenários Irregulares**

Este anexo apresenta os resultados obtidos para os cenários irregulares estudados descritos no item 3.3.2. As Figuras 120 a 131 apresentam as comparações entre os cenários que consideraram uma minimização da componente refletida externa e aqueles que consideraram uma refletância externa média de 0,3. Foi utilizada uma representação gráfica que apresenta o valor de Autonomia de Luz Natural (DA) para 200 lux em cada ponto do eixo central da malha de cálculo no sentido da profundidade do ambiente. A explicação da representação gráfica está descrita no tópico 4.3 e a escala de cores utilizada na Figura 84.

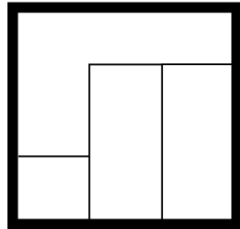
Figura 120 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Norte



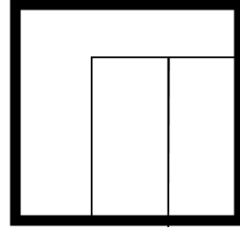
Cidade	Orientação Solar	Cenário	CRE = 0,05   ab = 1													CRE = 0,35   ab = 5												
			0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA	0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA
BRA	NORTE	OB_LE24_LD24	99	100	98	97	92	61	0	0	0	0	0	0	43	100	100	99	97	97	93	91	87	79	67	57	27	88
BRA	NORTE	OB_LE48_LD24	99	99	98	94	88	17	0	0	0	0	0	44	100	100	98	97	94	92	88	80	72	53	28	20	82	
BRA	NORTE	OB_LE72_LD24	99	99	97	93	83	1	0	0	0	0	0	42	99	99	98	97	94	91	84	75	65	47	24	15	76	
BRA	NORTE	OB_LE24_LD48	99	99	98	97	91	27	0	0	0	0	0	42	100	100	98	97	96	92	91	84	74	57	55	18	83	
BRA	NORTE	OB_LE48_LD48	99	99	97	93	80	0	0	0	0	0	0	39	100	99	98	97	94	91	86	78	65	45	26	14	76	
BRA	NORTE	OB_LE72_LD48	99	98	96	92	70	2	0	0	0	0	0	38	99	99	97	96	93	90	83	71	56	32	18	9	71	
BRA	NORTE	OB_LE24_LD72	99	99	98	97	90	36	0	0	0	0	0	40	99	99	98	97	96	93	90	83	65	50	27	34	79	
BRA	NORTE	OB_LE48_LD72	99	99	97	92	71	0	0	0	0	0	0	40	99	99	98	97	93	92	85	74	53	34	16	12	71	
BRA	NORTE	OB_LE72_LD72	98	98	97	94	51	0	0	0	0	0	0	39	99	98	97	96	93	90	81	67	44	25	19	14	67	



Cidade	Orientação Solar	Cenário	CRE = 0,05   ab = 1													CRE = 0,35   ab = 5												
			0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA	0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA
BRA	NORTE	LV_LE24_LD24	99	100	98	97	97	93	90	82	40	16	6	0	65.3	100	100	99	98	97	97	93	92	90	89	89	85	100
BRA	NORTE	LV_LE48_LD24	99	99	98	97	94	92	89	70	32	11	0	0	65.3	100	100	98	97	97	94	93	91	89	88	81	85	100
BRA	NORTE	LV_LE72_LD24	99	99	98	97	94	92	89	74	36	3	3	0	61.1	99	99	98	97	97	94	93	91	89	86	79	83	100
BRA	NORTE	LV_LE24_LD48	99	99	98	97	97	92	89	83	44	12	0	0	62.5	100	100	99	97	97	97	93	92	90	89	89	88	100
BRA	NORTE	LV_LE48_LD48	99	99	98	97	93	90	88	69	30	7	4	0	59.7	100	100	98	97	97	94	92	91	89	85	73	86	100
BRA	NORTE	LV_LE72_LD48	99	98	97	96	93	91	88	75	34	12	6	0	56.9	99	99	98	97	96	93	92	91	89	85	85	85	100
BRA	NORTE	LV_LE24_LD72	99	99	98	97	95	92	90	79	38	9	0	0	62.5	99	99	98	97	97	97	93	92	90	88	87	88	100
BRA	NORTE	LV_LE48_LD72	99	99	97	96	93	91	84	72	32	8	0	0	58.3	99	99	98	97	97	94	93	91	89	87	86	84	100
BRA	NORTE	LV_LE72_LD72	98	98	97	95	92	91	89	67	34	14	3	0	58.3	99	98	97	97	96	93	92	91	89	85	85	84	100



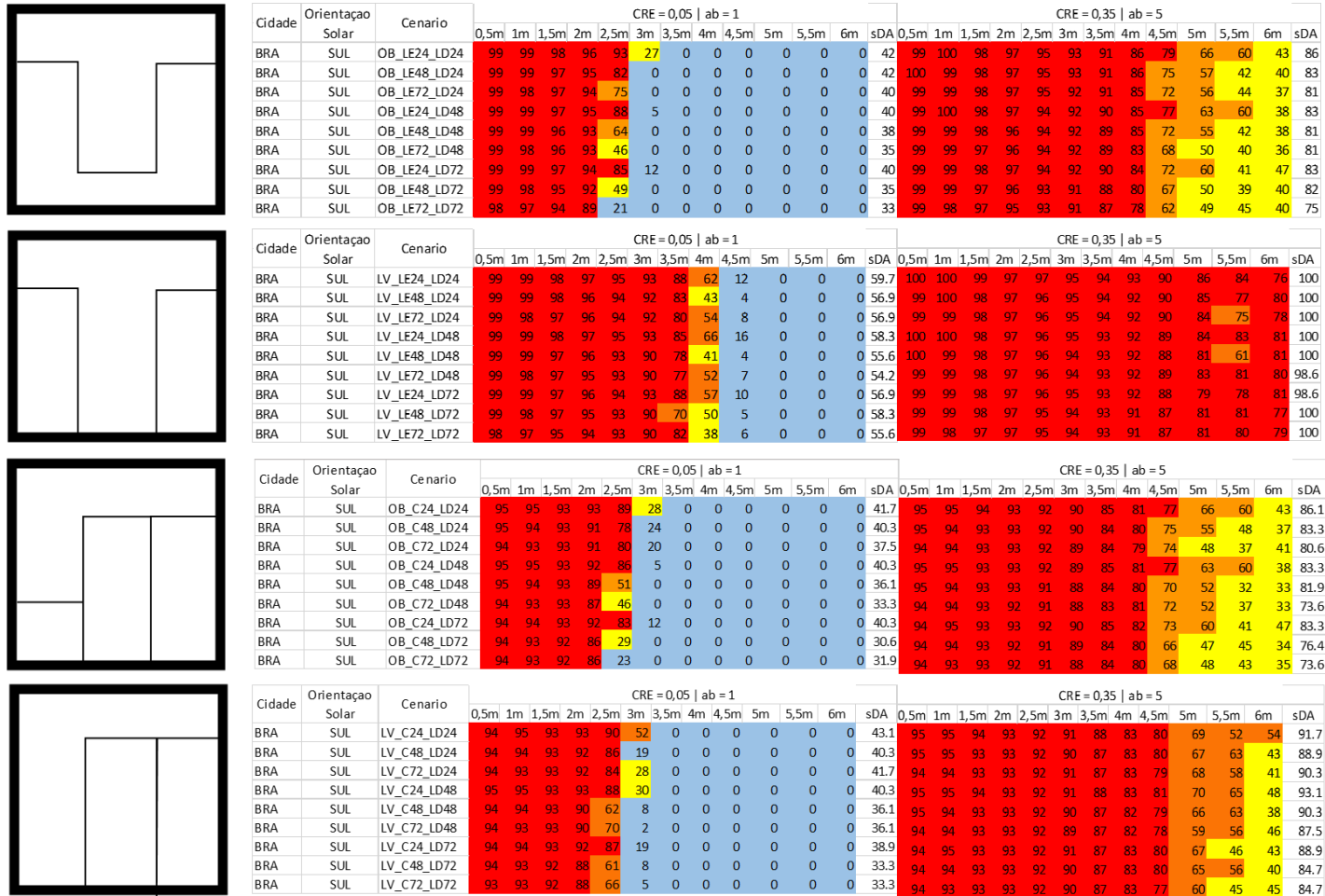
Cidade	Orientação Solar	Cenário	CRE = 0,05   ab = 1													CRE = 0,35   ab = 5												
			0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA	0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA
BRA	NORTE	OB_C24_LD24	95	95	93	92	89	58	0	0	0	0	0	0	43.1	95	95	94	93	92	90	86	82	77	67	57	27	87.5
BRA	NORTE	OB_C48_LD24	95	94	93	91	82	55	0	0	0	0	0	0	41.7	95	94	93	93	91	90	85	80	74	54	40	10	79.2
BRA	NORTE	OB_C72_LD24	94	93	93	91	82	48	0	0	0	0	0	0	40.3	94	94	93	93	91	89	84	78	72	36	10	20	76.4
BRA	NORTE	OB_C24_LD48	95	95	93	92	86	26	0	0	0	0	0	0	40.3	95	95	93	93	92	88	83	79	71	57	55	18	83.3
BRA	NORTE	OB_C48_LD48	95	94	92	89	65	18	0	0	0	0	0	0	36.1	95	94	93	92	90	87	81	76	64	44	15	8	76.4
BRA	NORTE	OB_C72_LD48	94	93	92	87	63	15	0	0	0	0	0	0	36.1	94	94	93	92	90	87	81	77	65	35	9	4	69.4
BRA	NORTE	OB_C24_LD72	94	94	93	91	84	34	0	0	0	0	0	0	40.3	94	94	93	93	91	88	81	77	63	49	27	33	77.8
BRA	NORTE	OB_C48_LD72	94	93	90	82	51	18	0	0	0	0	0	0	31.9	94	94	93	92	90	86	80	73	54	35	28	8	72.2
BRA	NORTE	OB_C72_LD72	94	93	91	82	41	13	0	0	0	0	0	0	31.9	94	93	93	92	90	86	79	72	53	26	17	5	66.7



Cidade	Orientação Solar	Cenário	CRE = 0,05   ab = 1													CRE = 0,35   ab = 5												
			0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA	0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m	5m	5,5m	6m	sDA
BRA	NORTE	LV_C24_LD24	94	95	93	93	90	71	2	0	0	0	0	0	45.8	95	95	94	93	92	90	87	82	78	69	51	53	91.7
BRA	NORTE	LV_C48_LD24	94	94	93	91	87	47	5	0	0	0	0	0	41.7	95	94	93	93	92	90	87	82	78	66	62	26	88.9
BRA	NORTE	LV_C72_LD24	94	93	93	91	85	56	1	0	0	0	0	0	43.1	94	94	93	93	92	90	87	82	77	66	53	14	84.7
BRA	NORTE	LV_C24_LD48	95	94	93	92	88	55	3	0	0	0	0	0	45.8	95	95	93	93	92	90	85	80	75	64	58	38	88.9
BRA	NORTE	LV_C48_LD48	94	94	92	89	68	27	2	0	0	0	0	0	37.5	95	94	93	93	91	89	84	79	71	60	57	20	87.5
BRA	NORTE	LV_C72_LD48	94	93	93	89	75	21	1	0	0	0	0	0	37.5	94	94	93	92	91	87	84	79	70	52	42	27	79.2
BRA	NORTE	LV_C24_LD72	94	94	93	92	87	41	1	0	0	0	0	0	41.7	94	94	93	93	92	89	84	78	68	56	36	24	83.3
BRA	NORTE	LV_C48_LD72	94	93	91	86	66	26	2	0	0	0	0	0	34.7	94	94	93	92	91	88	84	79	68	53	45	19	77.8
BRA	NORTE	LV_C72_LD72	93	93	91	86	68	22	4	0	0	0	0	0	33.3	94	93	93	92	91	88	82	78	62	40	22	26	72.2

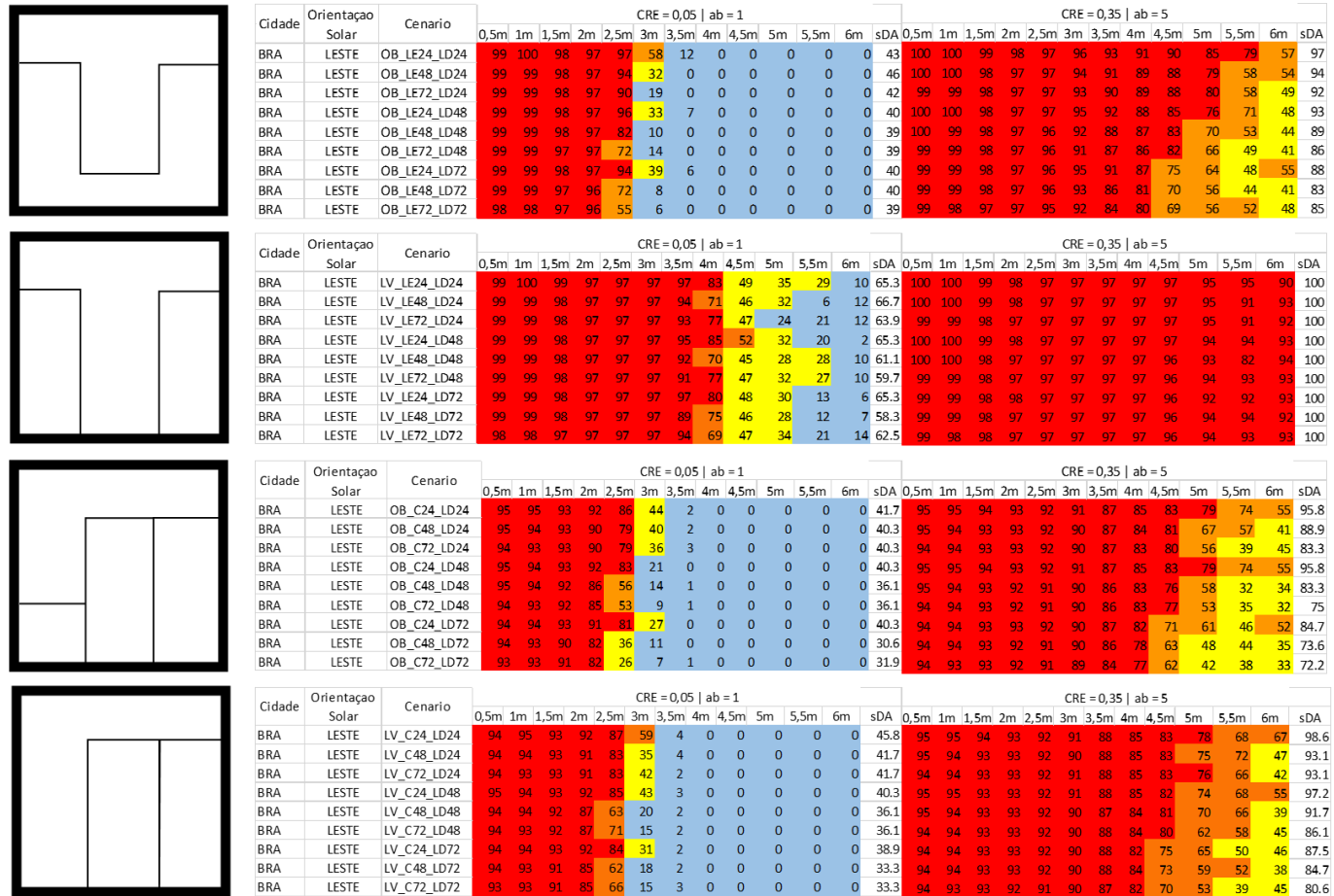
Fonte: Autora (2020)

Figura 121 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Sul



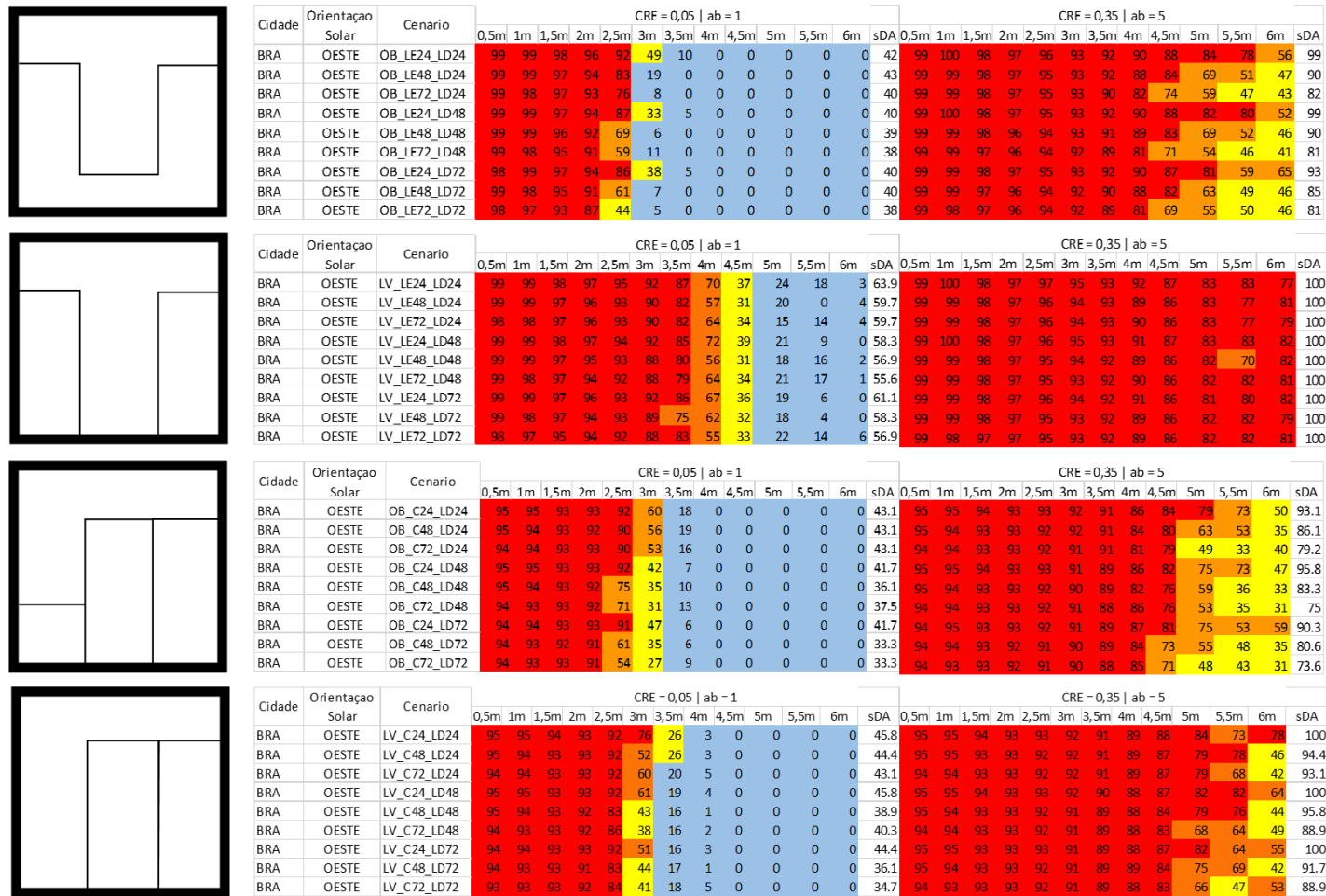
Fonte: Autora (2020)

Figura 122 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Leste



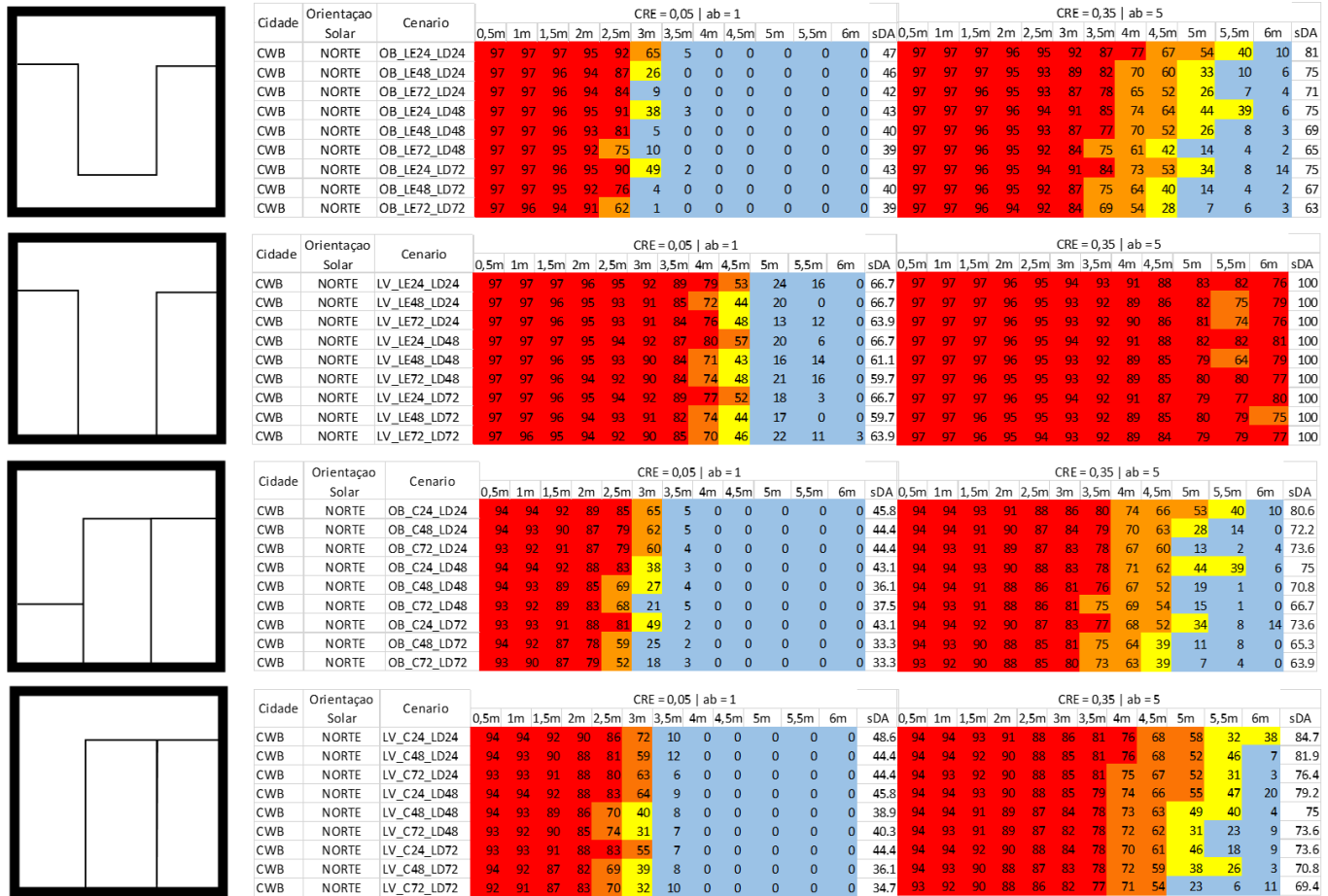
Fonte: Autora (2020)

Figura 123 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Oeste



Fonte: Autora (2020)

Figura 124 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Norte

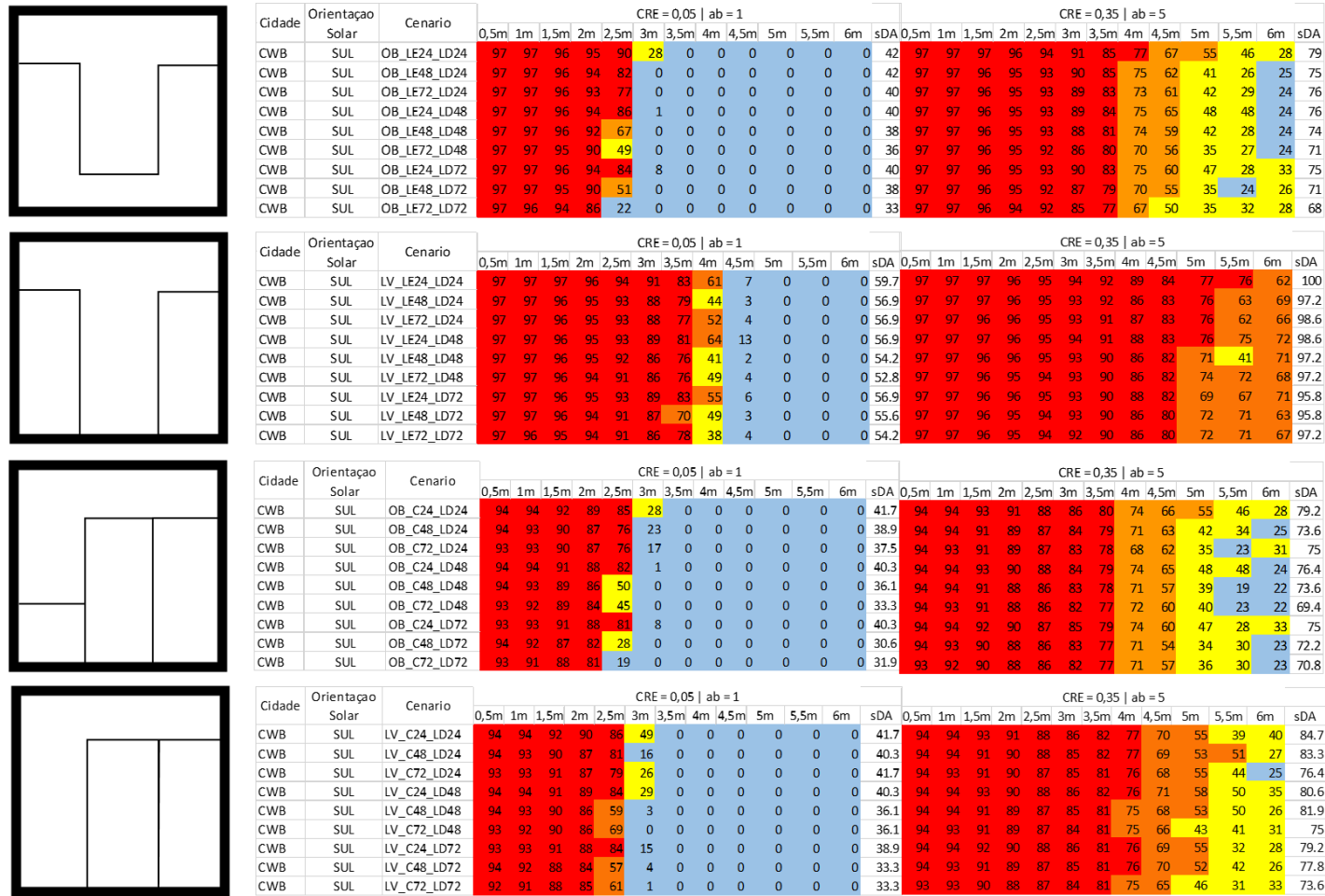


Fonte: Autora (2020)



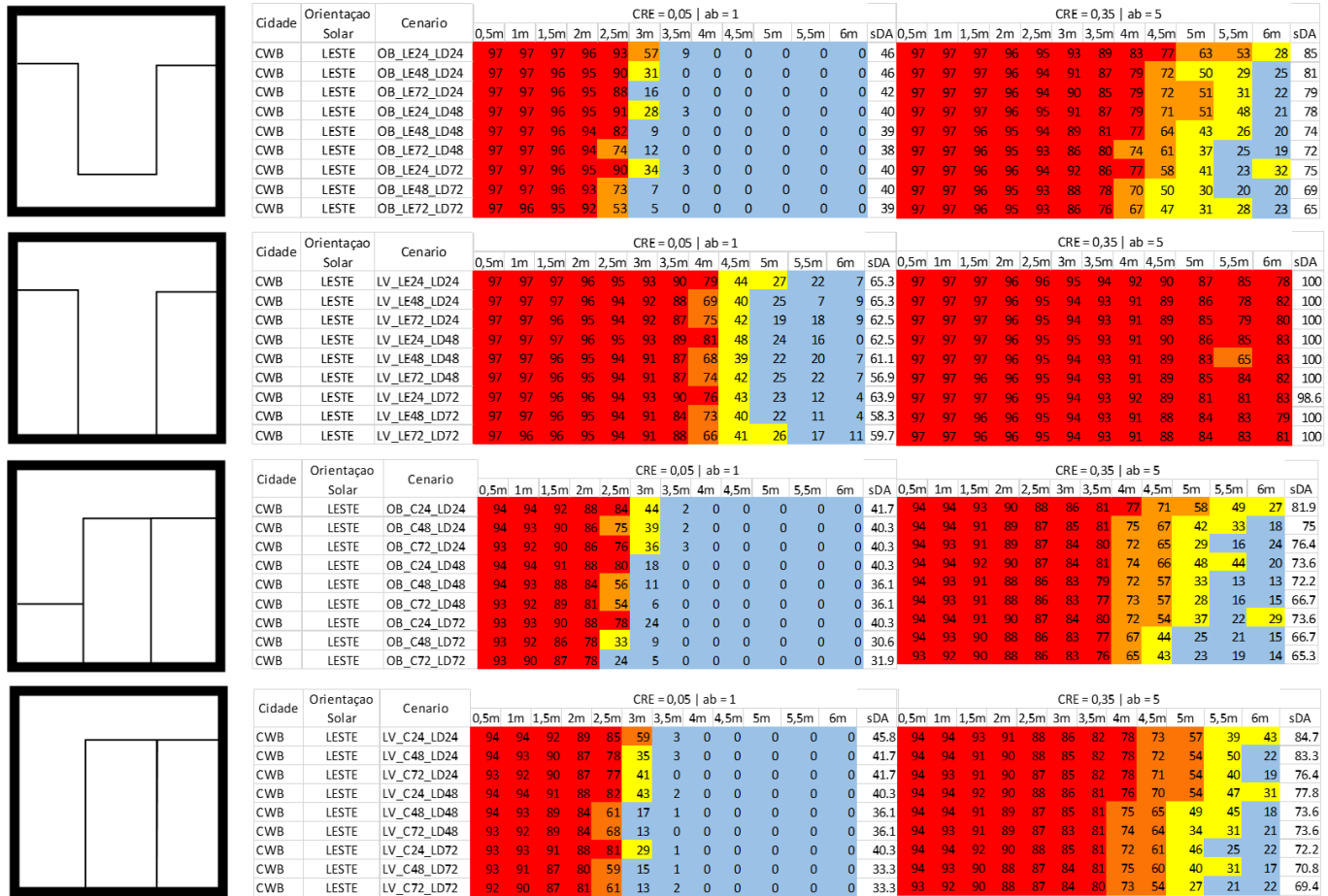


Figura 125 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Sul



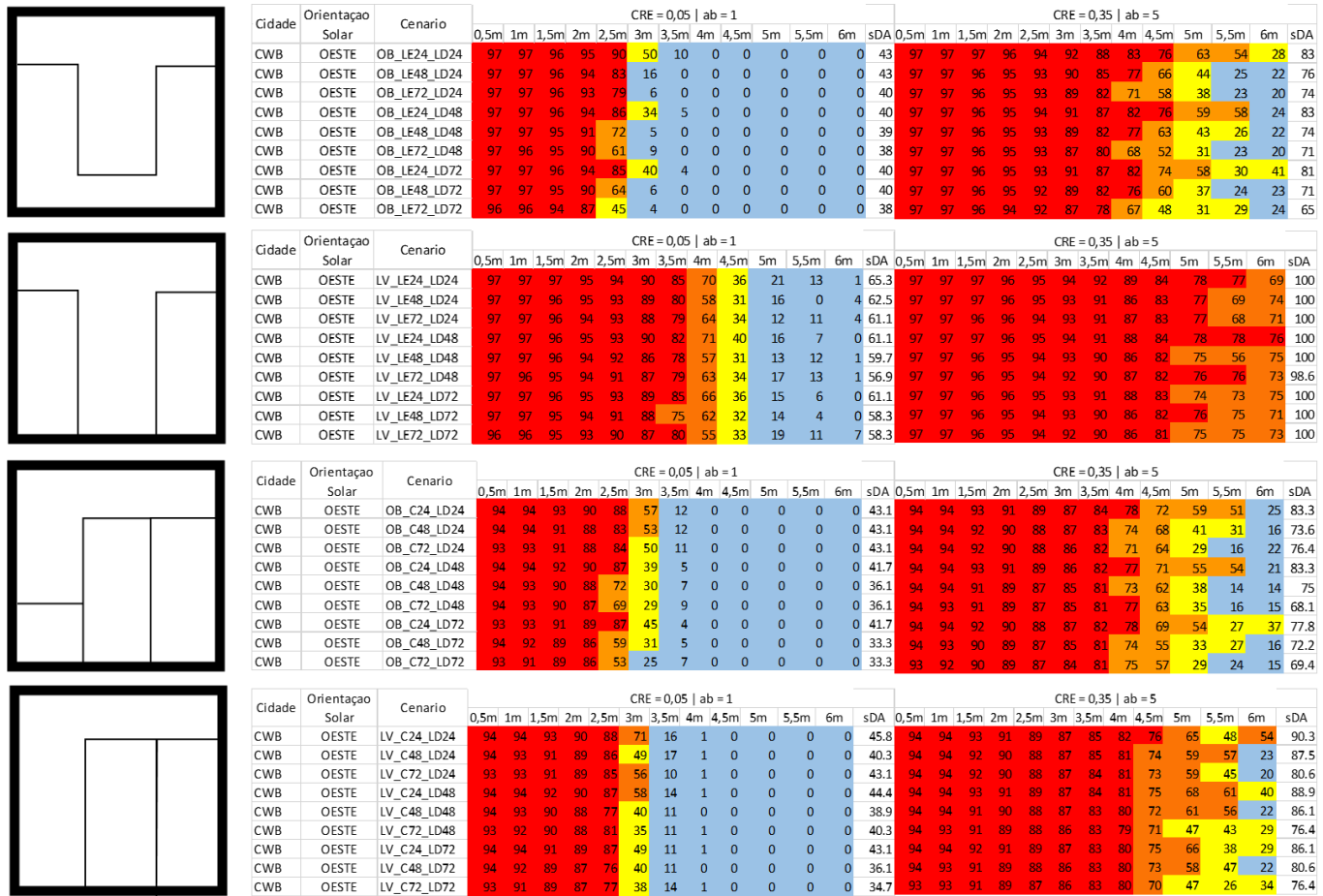
Fonte: Autora (2020)

Figura 126 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Leste



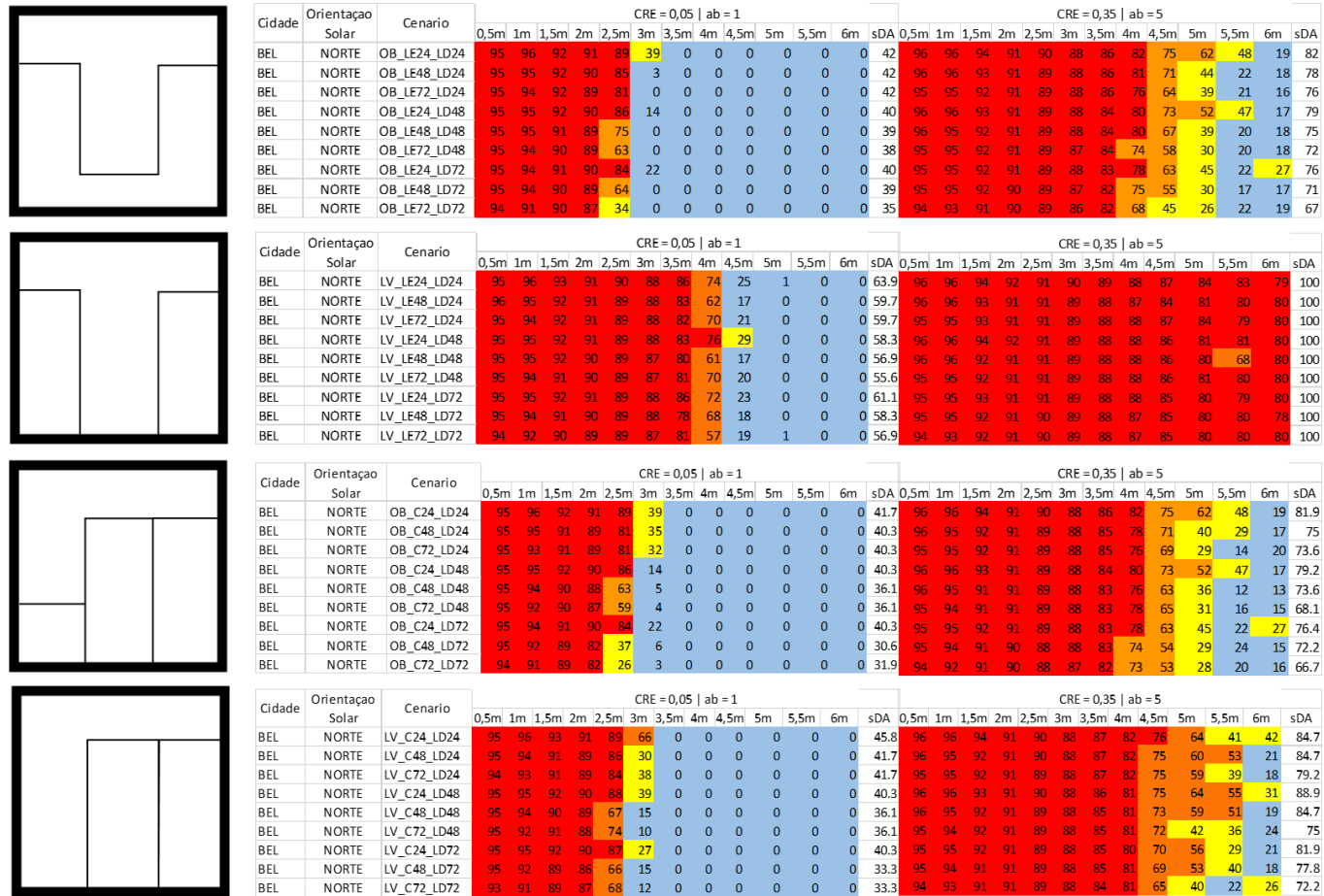
Fonte: Autora (2020)

Figura 127 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Oeste



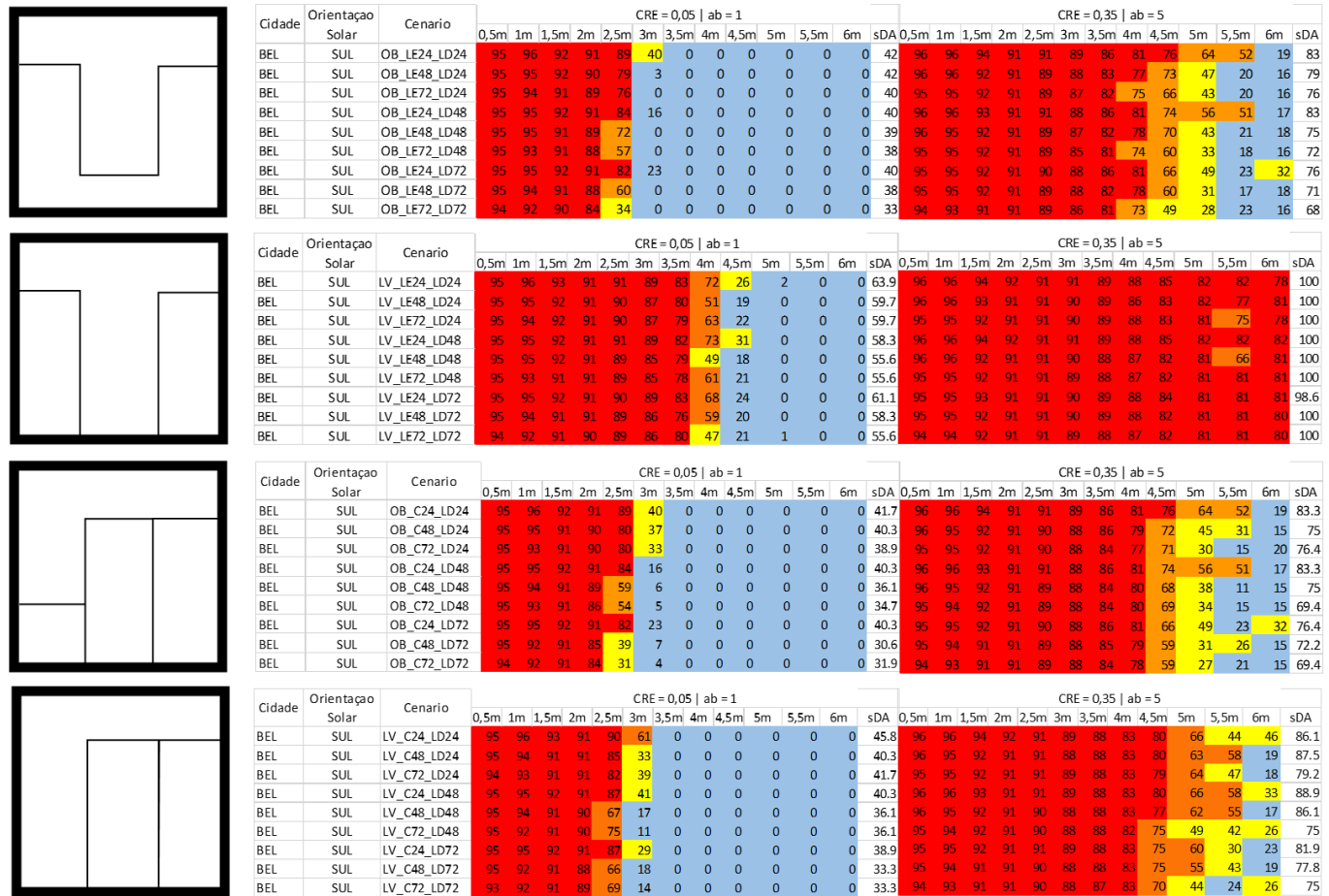
Fonte: Autora (2020)

Figura 128 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Norte



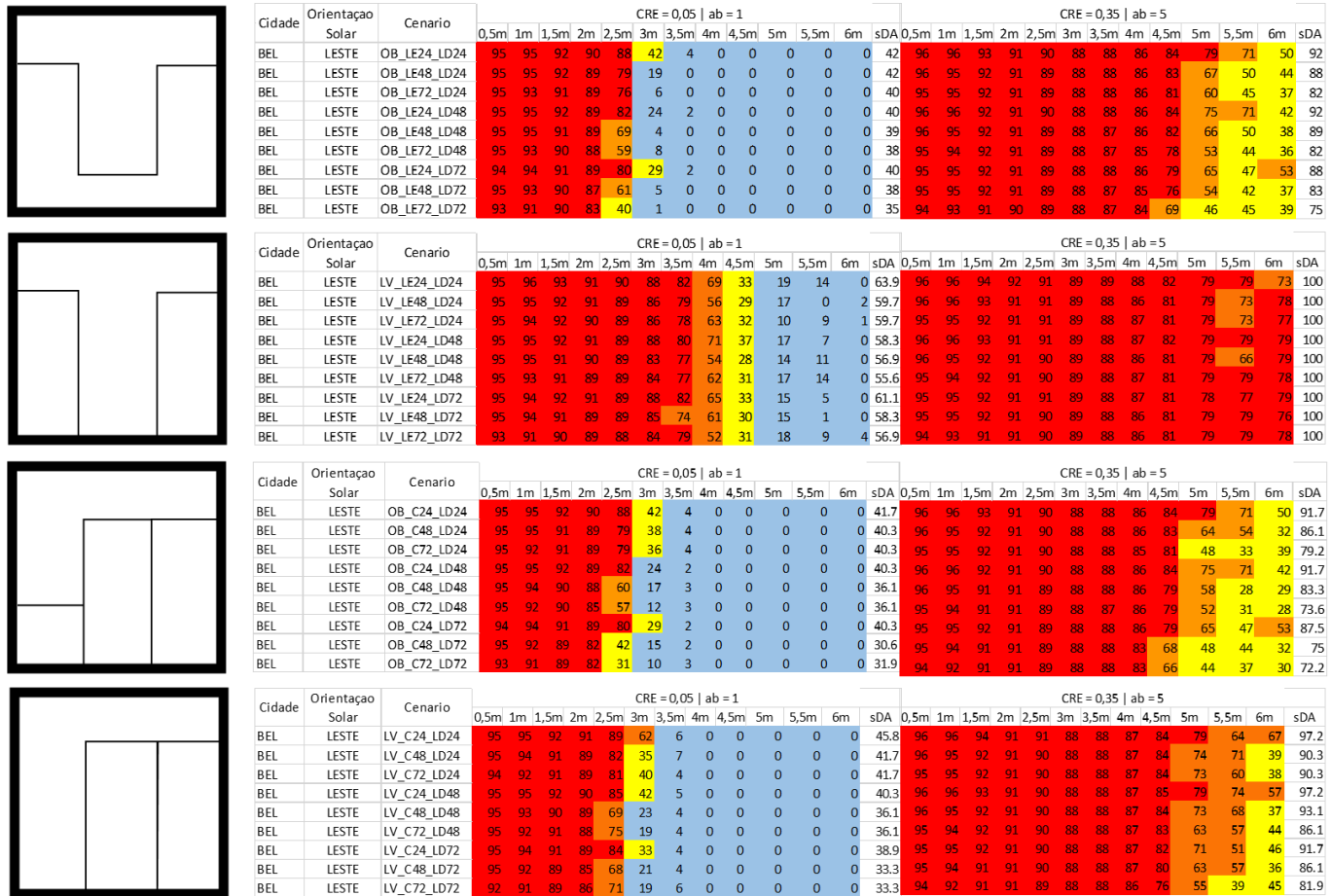
Fonte: Autora (2020)

Figura 129 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Sul



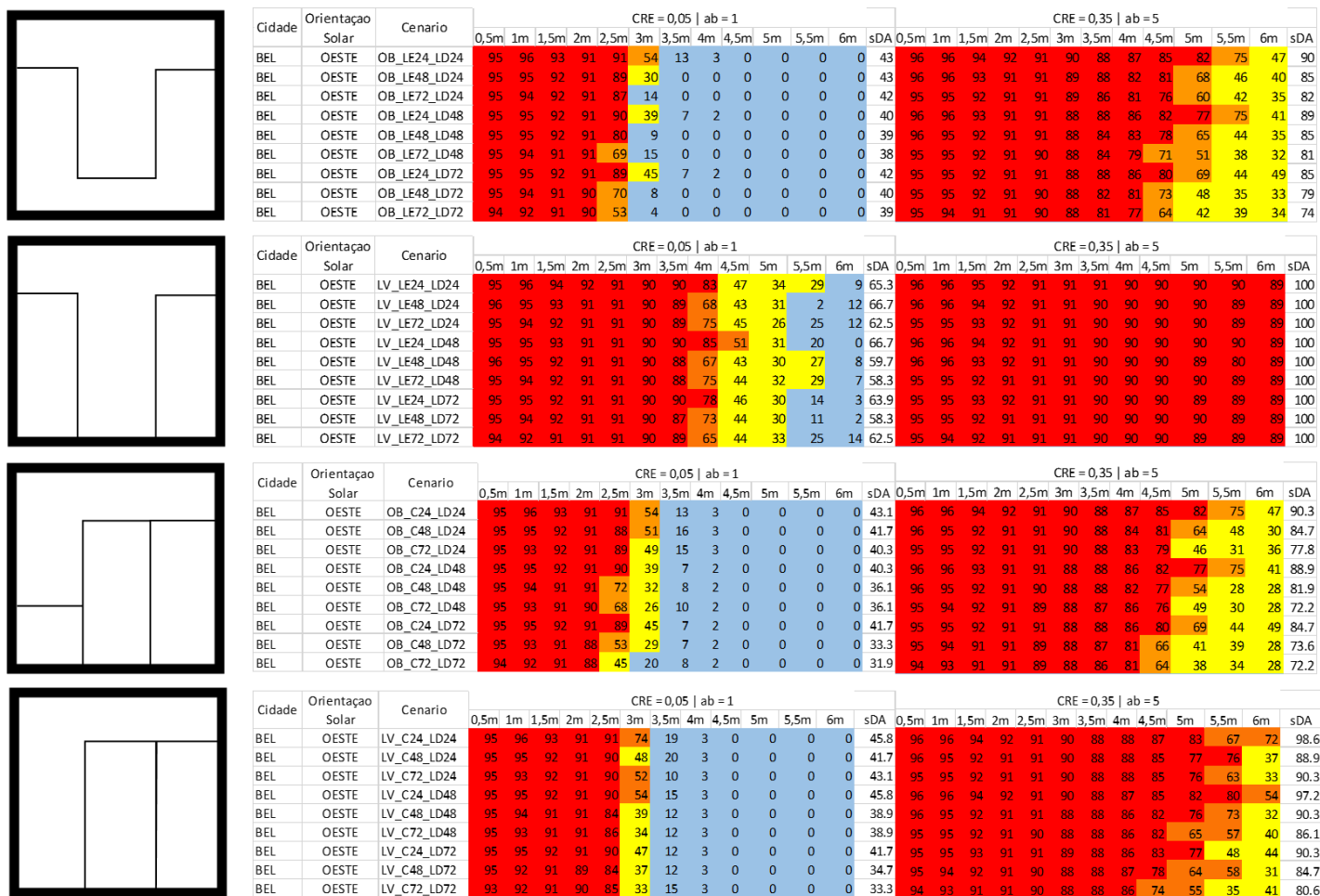
Fonte: Autora (2020)

Figura 130 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Leste



Fonte: Autora (2020)

Figura 131 - Distribuição dos Valores de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Oeste



Fonte: Autora (2020)





## ANEXO B - Definição do Ângulo Vertical Representativo

O Anexo B apresenta os resultados obtidos no cálculo dos ângulos representativos para todos os cenários irregulares analisados.

Tabela 6- Definição do Ângulo Vertical Representativo - Brasília

Brasília									
Bloco Lateral		Bloco Central		Bloco Lateral		Ângulo Representativo Calculado (°)			
Ang Hor	Ang Ver	Ang Hor	Ang Ver	Ang Hor	Ang Ver	Norte	Sul	Leste	Oeste
40	24			40	24	14	11	7	6
40	48			40	24	22	15	11	6
40	72			40	24	26	21	16	8
40	24			40	48	22	15	8	9
40	48			40	48	30	20	12	10
40	72			40	48	34	25	17	11
40	24			40	72	26	21	10	13
40	48			40	72	34	25	15	13
40	72			40	72	38	30	19	15
40	24	40	24	40	24	20	16	13	11
40	48	40	24	40	24	28	21	17	12
40	72	40	24	40	24	32	26	22	14
40	24	40	24	40	48	28	21	14	14
40	48	40	24	40	48	36	25	18	15
40	72	40	24	40	48	40	30	23	17
40	24	40	24	40	72	32	26	16	18
40	48	40	24	40	72	40	30	21	19
40	72	40	24	40	72	44	36	25	21
40	24	40	24			13	11	9	9
40	48	40	24			19	16	15	14
40	72	40	24			25	22	20	19
40	24	40	48			21	15	10	12
40	48	40	48			27	21	16	17
40	72	40	48			33	26	21	22
40	24	40	72			25	21	12	16
40	48	40	72			31	26	18	21
40	72	40	72			37	31	24	26
40	24	40	24	40	24	20	16	13	11
40	48	40	24	40	24	26	22	19	16
40	72	40	24	40	24	32	27	25	22
40	24	40	48	40	24	28	21	14	14
40	48	40	48	40	24	34	26	20	19
40	72	40	48	40	24	40	32	26	25
40	24	40	72	40	24	32	26	16	18
40	48	40	72	40	24	38	31	22	23
40	72	40	72	40	24	44	37	28	29

Fonte: Autora (2020)

Tabela 7 - Definição do Angulo Vertical Representativo- Curitiba

Curitiba									
Bloco Lateral		Bloco Central		Bloco Lateral		Ângulo Representativo Calculado (°)			
Ang Hor	Ang Ver	Ang Hor	Ang Ver	Ang Hor	Ang Ver	Norte	Sul	Leste	Oeste
40	24			40	24	14	10	8	7
40	48			40	24	18	14	12	8
40	72			40	24	23	18	17	10
40	24			40	48	17	14	9	10
40	48			40	48	21	18	13	11
40	72			40	48	26	22	18	13
40	24			40	72	22	18	11	15
40	48			40	72	26	22	15	16
40	72			40	72	31	26	20	18
40	24	40	24	40	24	20	16	14	12
40	48	40	24	40	24	24	20	18	13
40	72	40	24	40	24	29	23	23	15
40	24	40	24	40	48	23	20	15	16
40	48	40	24	40	48	27	24	19	17
40	72	40	24	40	48	32	27	24	19
40	24	40	24	40	72	28	23	17	20
40	48	40	24	40	72	32	27	21	21
40	72	40	24	40	72	37	31	26	23
40	24	40	24			13	11	9	10
40	48	40	24			19	16	15	15
40	72	40	24			25	21	21	21
40	24	40	48			16	15	10	13
40	48	40	48			23	20	16	19
40	72	40	48			29	25	22	24
40	24	40	72			21	18	12	18
40	48	40	72			27	24	18	23
40	72	40	72			34	29	24	29
40	24	40	24	40	24	20	16	14	12
40	48	40	24	40	24	26	21	20	18
40	72	40	24	40	24	32	27	25	23
40	24	40	48	40	24	23	20	15	16
40	48	40	48	40	24	30	25	21	21
40	72	40	48	40	24	36	30	27	27
40	24	40	72	40	24	28	23	17	20
40	48	40	72	40	24	34	29	23	26
40	72	40	72	40	24	41	34	29	31

Fonte: Autora (2020)

Tabela 8 - Definição do Angulo Vertical Representativo - Belém

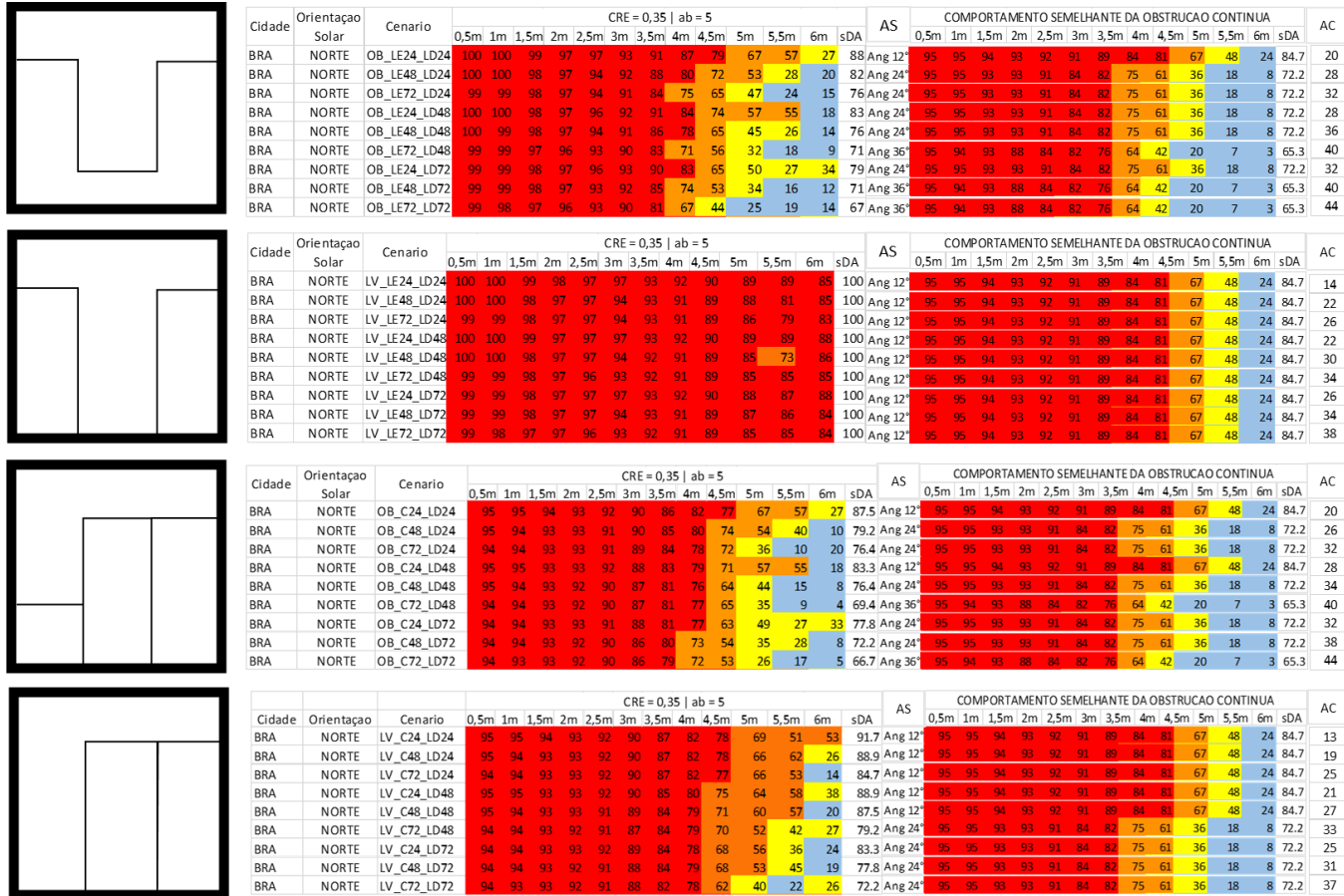
Belém									
Bloco Lateral		Bloco Central		Bloco Lateral		Ângulo Representativo Calculado (°)			
Ang Hor	Ang Ver	Ang Hor	Ang Ver	Ang Hor	Ang Ver	Norte	Sul	Leste	Oeste
40	24			40	24	13	13	6	6
40	48			40	24	17	18	8	8
40	72			40	24	26	26	13	12
40	24			40	48	17	19	8	9
40	48			40	48	21	24	11	11
40	72			40	48	30	32	15	15
40	24			40	72	26	26	12	13
40	48			40	72	31	32	15	15
40	72			40	72	40	40	19	19
40	24	40	24	40	24	19	19	11	12
40	48	40	24	40	24	23	24	14	14
40	72	40	24	40	24	32	32	18	18
40	24	40	24	40	48	23	25	14	15
40	48	40	24	40	48	28	30	16	17
40	72	40	24	40	48	37	38	20	21
40	24	40	24	40	72	32	32	18	19
40	48	40	24	40	72	37	38	20	21
40	72	40	24	40	72	46	46	24	25
40	24	40	24			12	12	8	9
40	48	40	24			19	19	14	15
40	72	40	24			25	25	19	21
40	24	40	48			17	18	11	12
40	48	40	48			23	25	16	18
40	72	40	48			29	31	22	24
40	24	40	72			26	26	14	16
40	48	40	72			32	32	20	22
40	72	40	72			38	38	26	28
40	24	40	24	40	24	19	19	11	12
40	48	40	24	40	24	25	25	17	18
40	72	40	24	40	24	31	31	22	24
40	24	40	48	40	24	23	25	14	15
40	48	40	48	40	24	29	31	19	21
40	72	40	48	40	24	35	37	25	27
40	24	40	72	40	24	32	32	18	19
40	48	40	72	40	24	38	38	23	25
40	72	40	72	40	24	44	44	29	31

Fonte: Autora (2020)

## **ANEXO C – Análise do Comportamento Semelhante entre Cenários Urbanos Irregulares e de Obstrução Contínua**

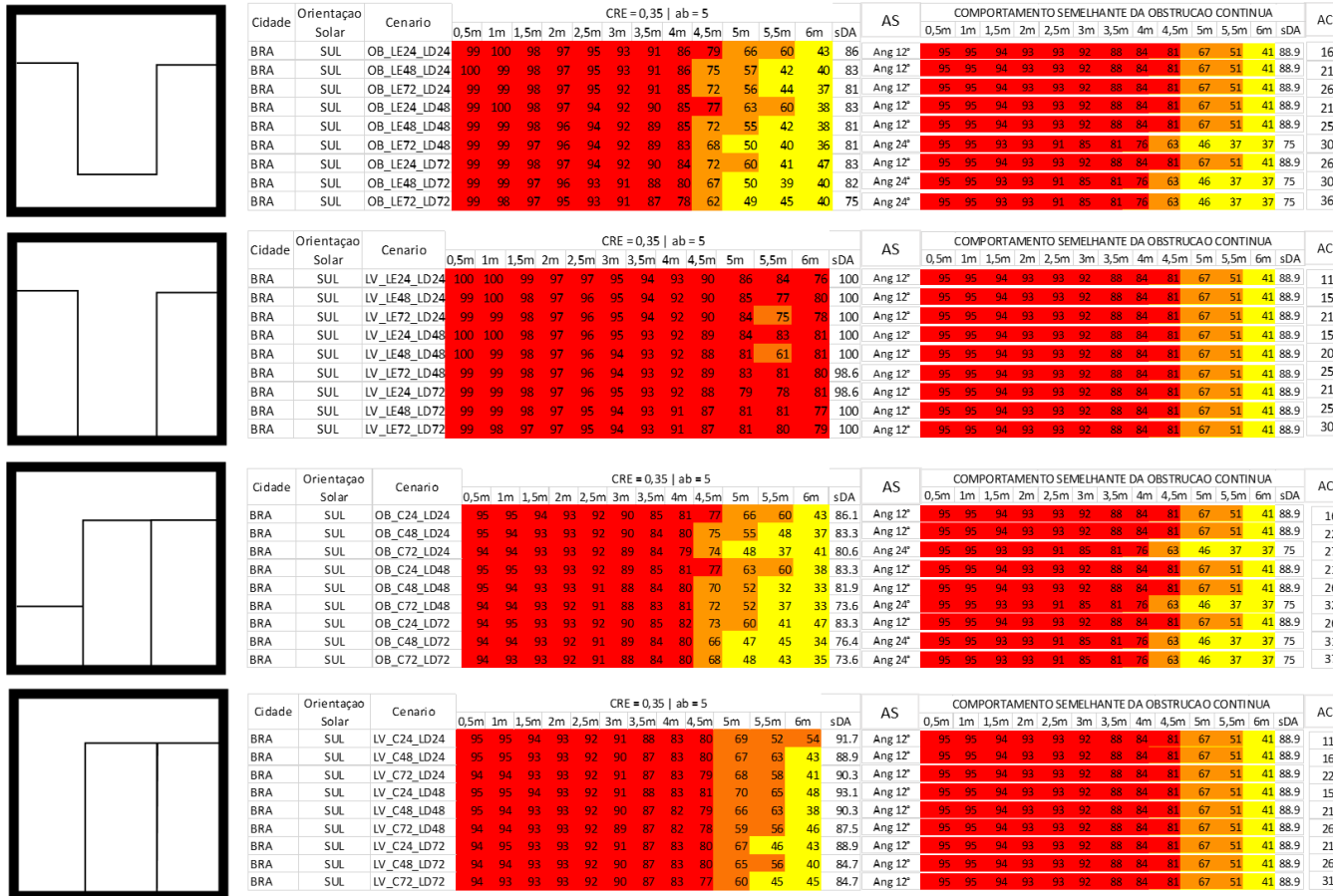
Neste anexo são apresentados os resultados da análise comparativa entre os resultados obtidos nos cenários urbanos irregulares e o comportamento semelhante de uma obstrução contínua. As Figuras 132 a 143 apresentam os resultados obtidos para todos os cenários irregulares estudados para a comparação entre os valores de Autonomia de Luz Natural ( $DA_{200}$ ). Na primeira coluna da direita está representada um iconograma com a tipologia de linha do horizonte (*skyline*). Em seguida, apresenta-se o comportamento luminoso ao longo do eixo da malha de cálculo no sentido de sua profundidade do cenário original ao lado do cenário de obstrução contínua que possui comportamento semelhante. Por fim, na última coluna é apresentado o resultado obtido para o ângulo vertical representativo calculado para cada cenário. Estão identificados nas colunas como AS o ângulo de comportamento semelhante e AC o ângulo calculado por meio da fórmula descrita no tópico 4.2.2. A explicação da representação gráfica está descrita no tópico 4.3 e a escala de cores utilizada na Figura 84.

Figura 132 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Norte



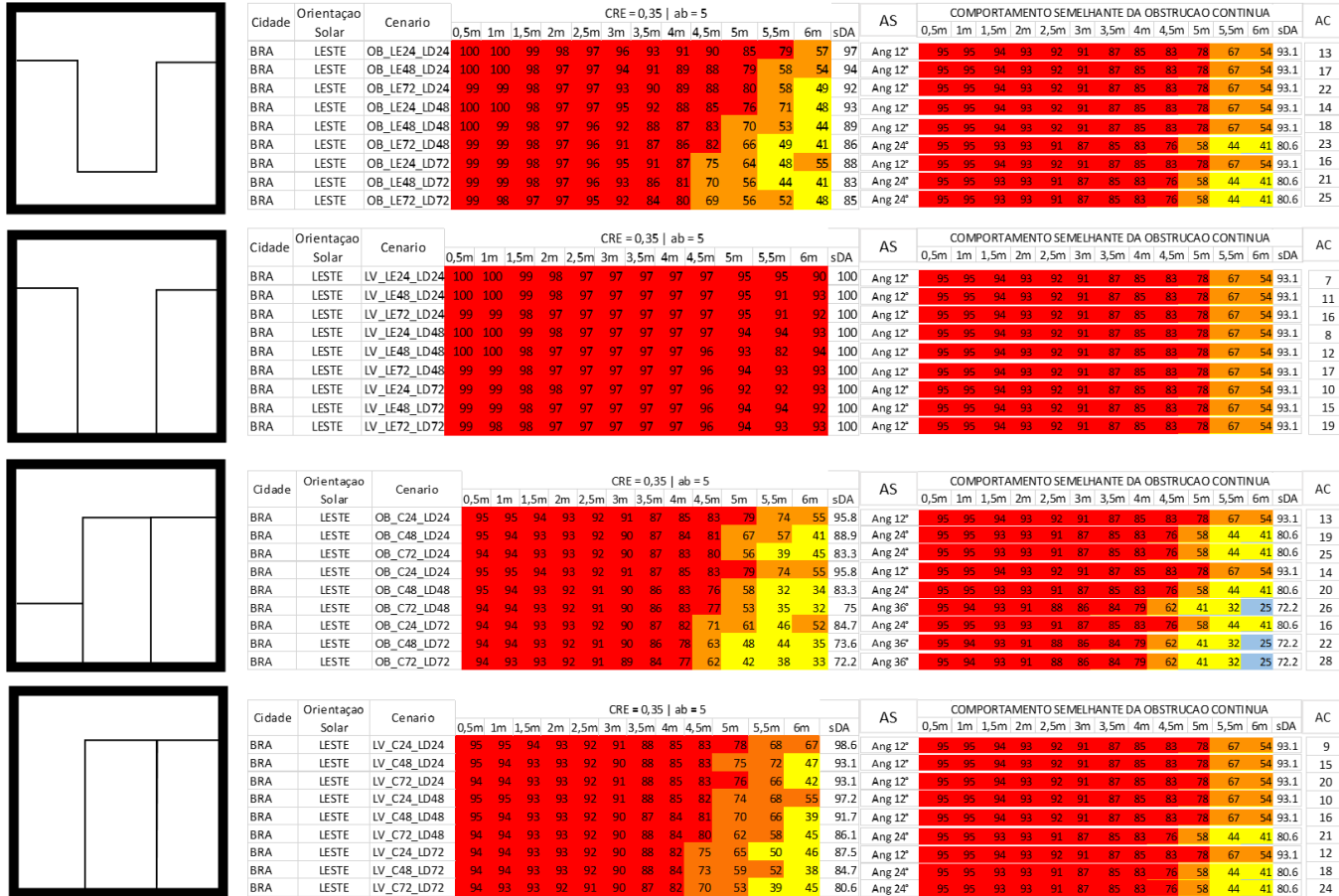
Fonte: Autora (2020)

Figura 133 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Sul



Fonte: Autora (2020)

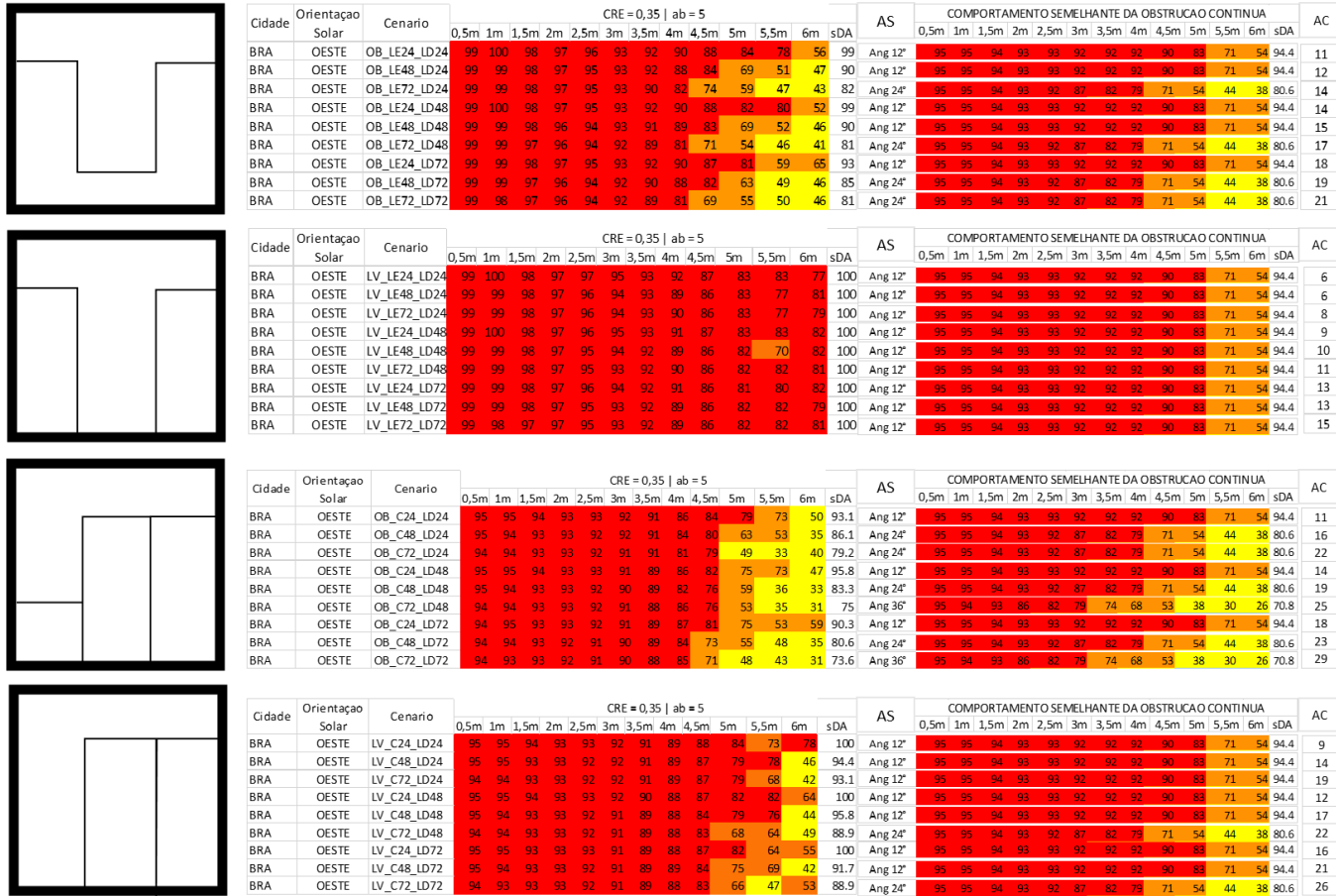
Figura 134 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Leste



Fonte: Autora (2020)

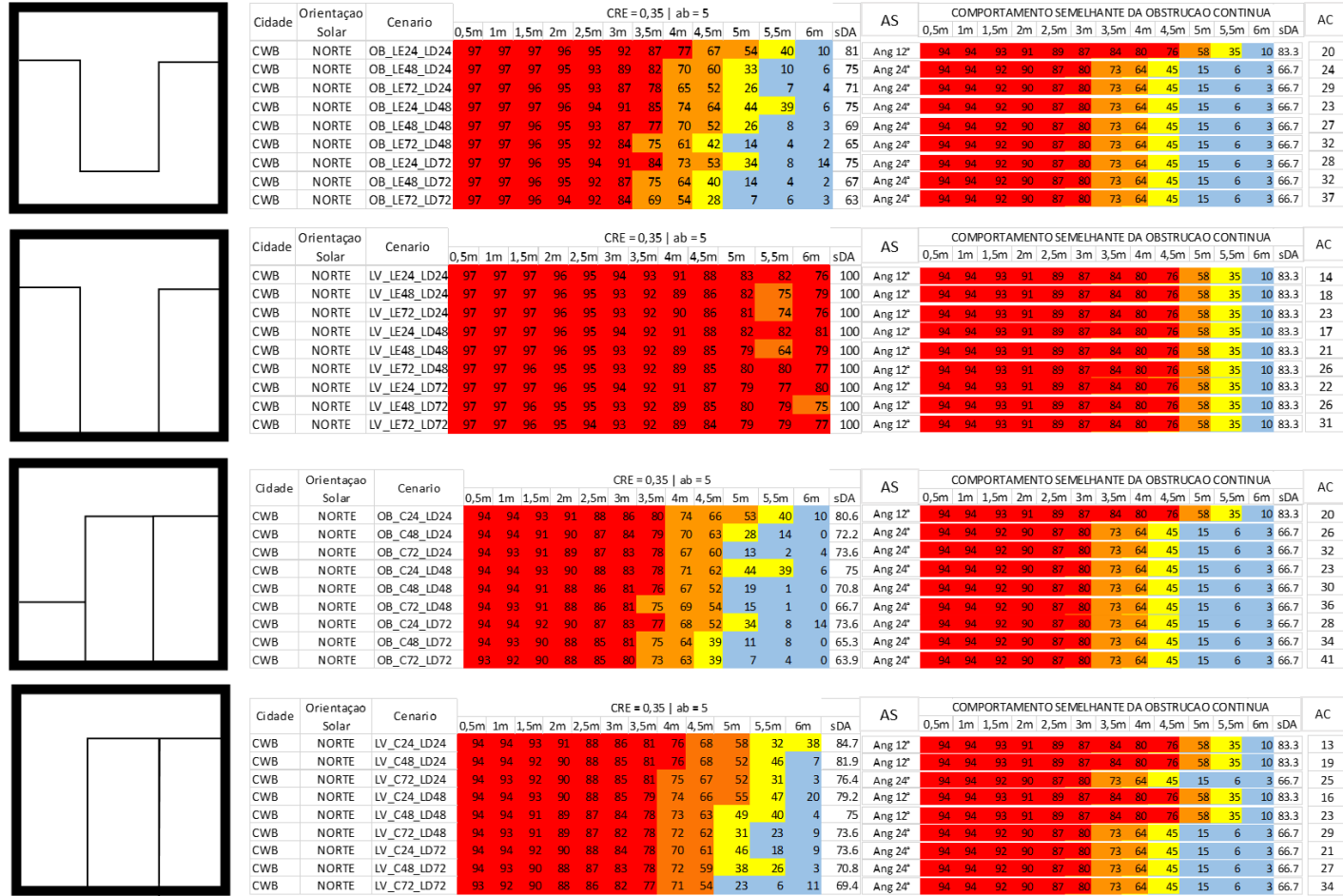


Figura 135 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Brasília Oeste



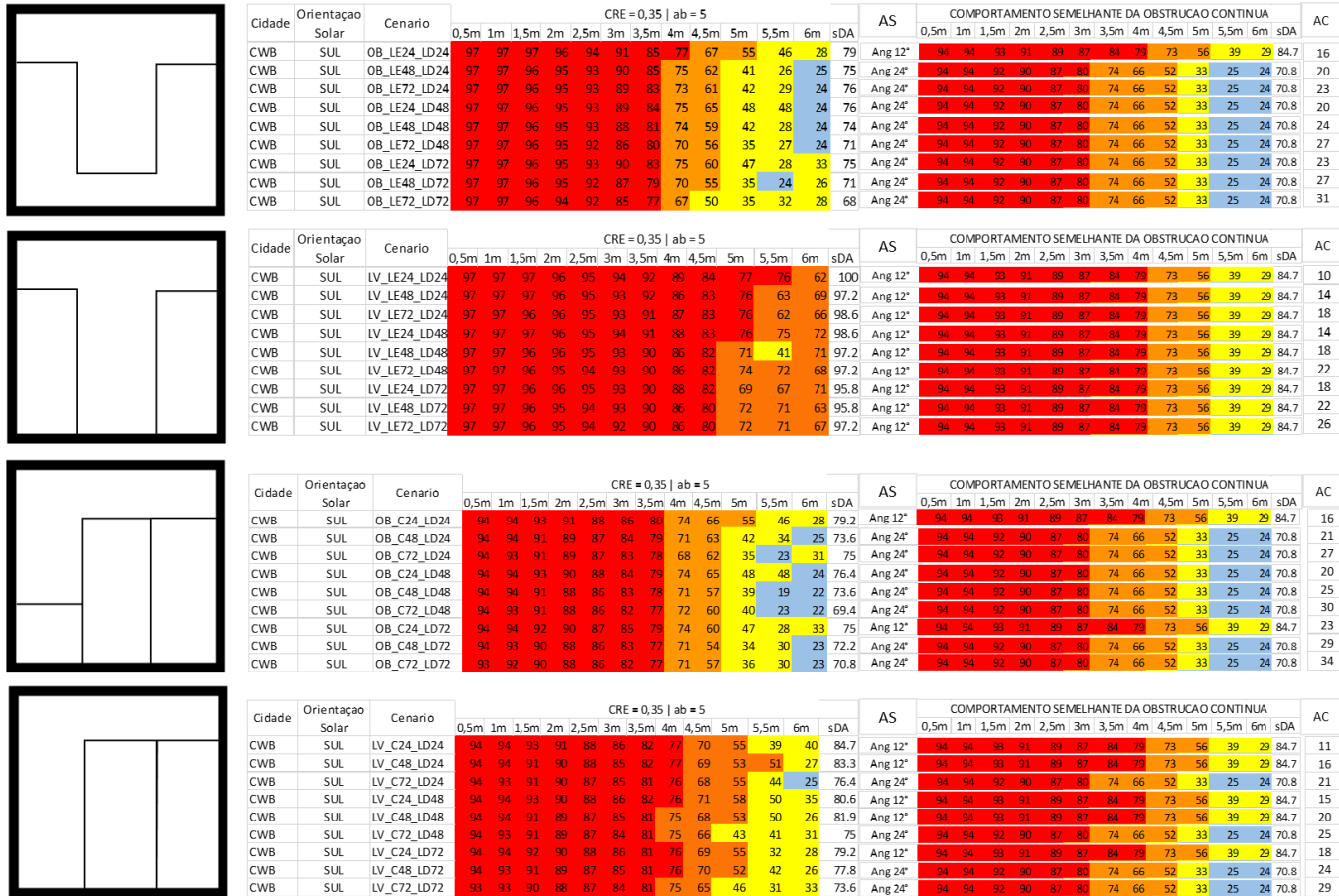
Fonte: Autora (2020)

Figura 136 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Norte



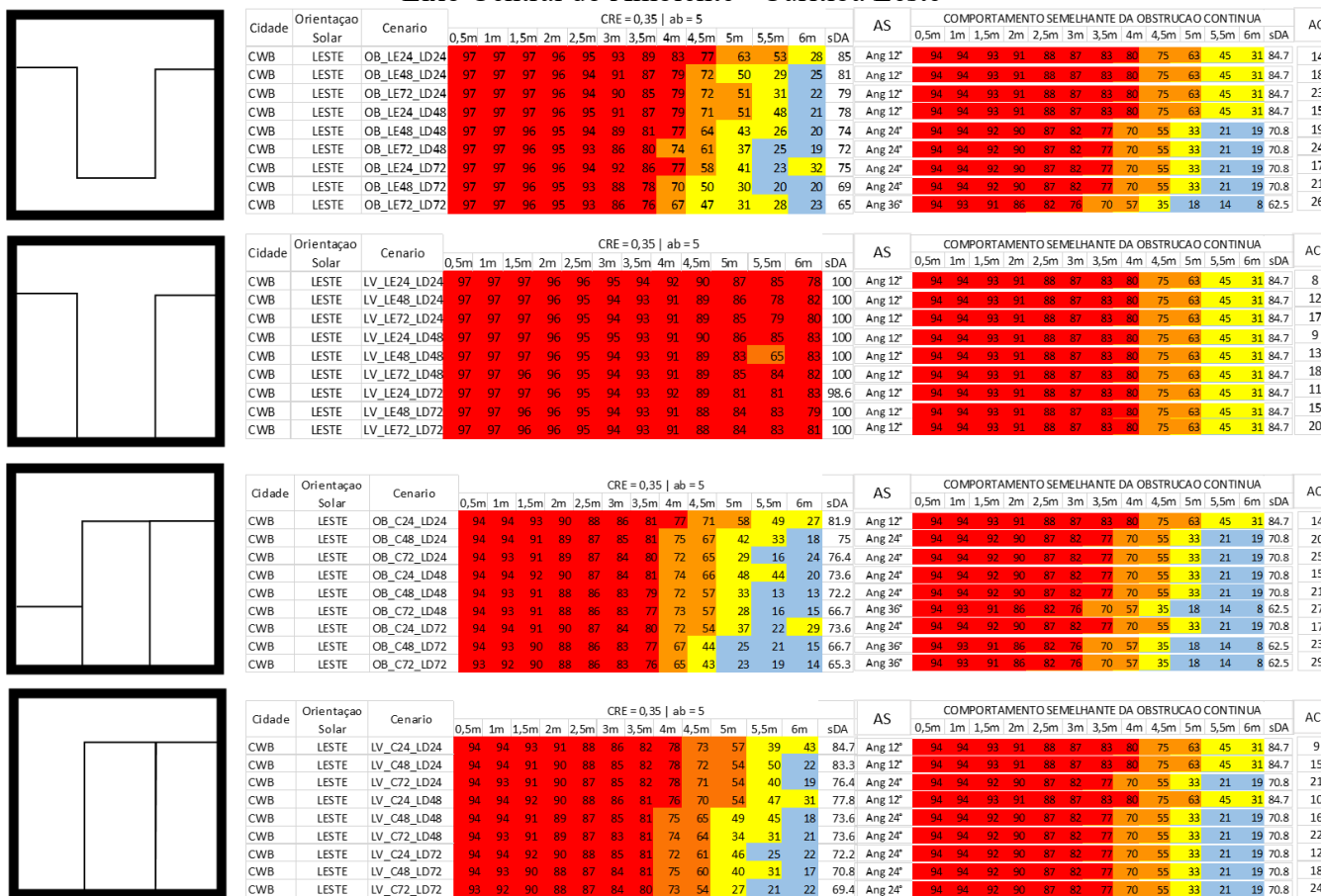
Fonte: Autora (2020)

Figura 137 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Sul



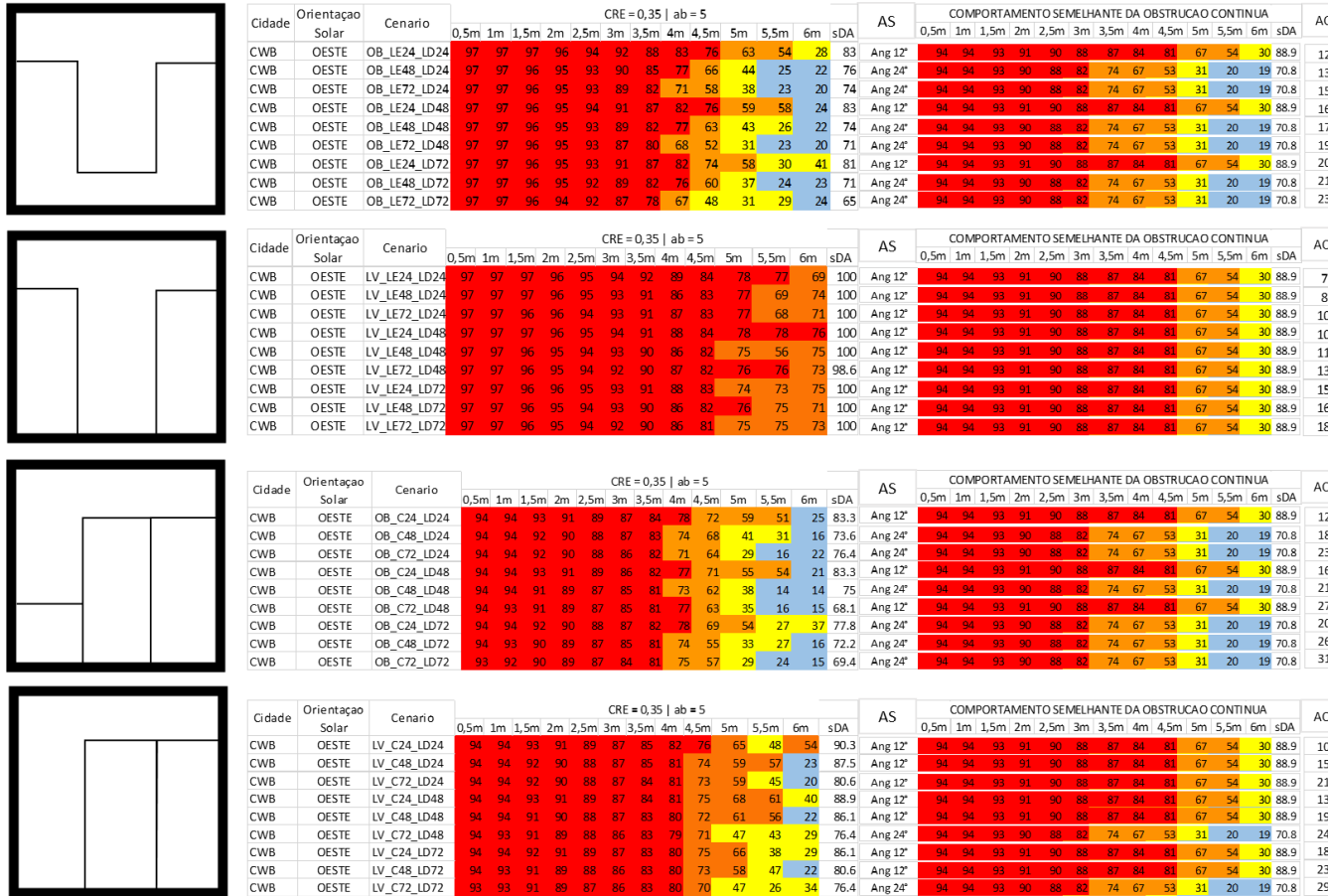
Fonte: Autora (2020)

Figura 138 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Leste



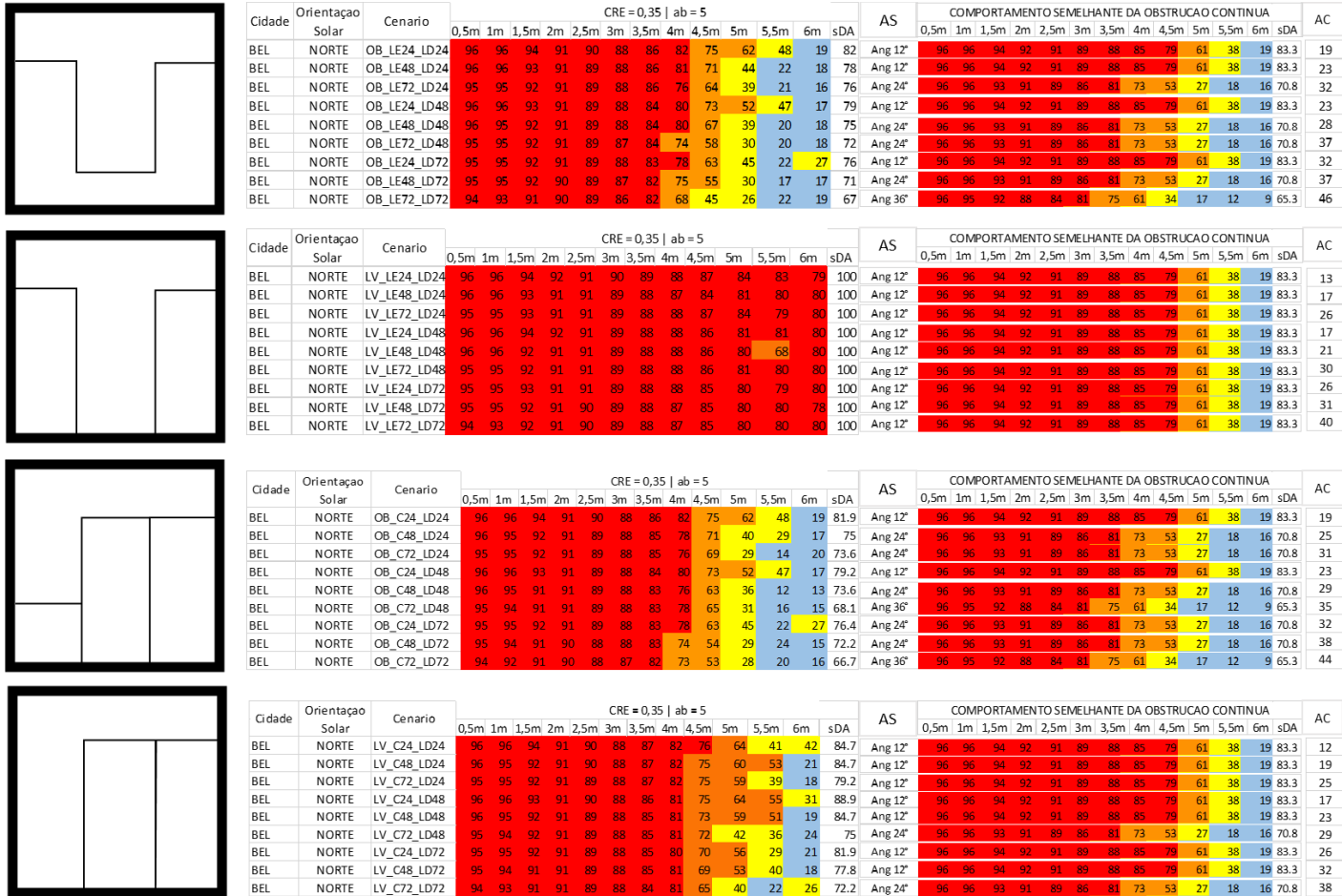
Fonte: Autora (2020)

Figura 139 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Curitiba Oeste



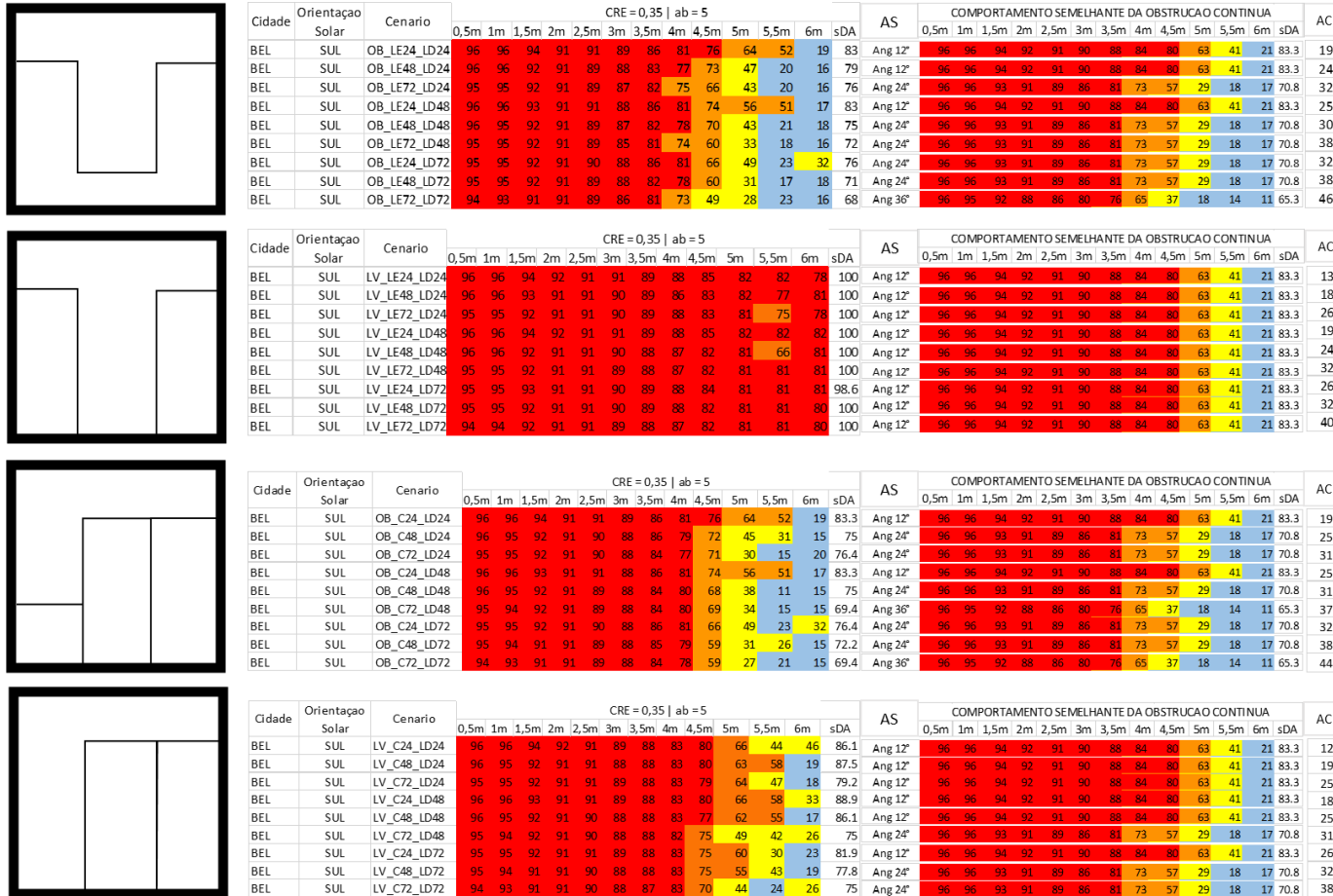
Fonte: Autora (2020)

Figura 140 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Norte



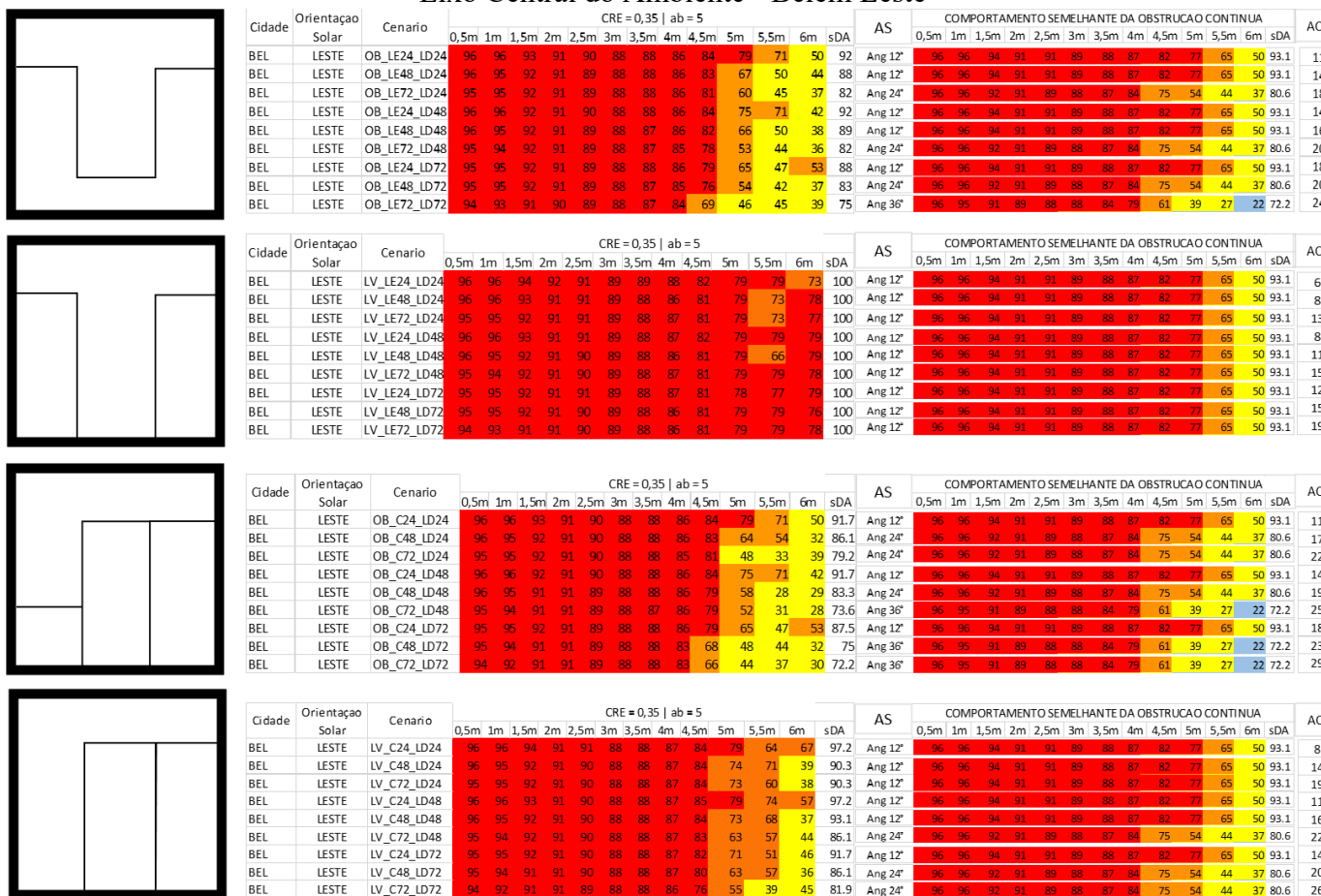
Fonte: Autora (2020)

Figura 141 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Sul



Fonte: Autora (2020)

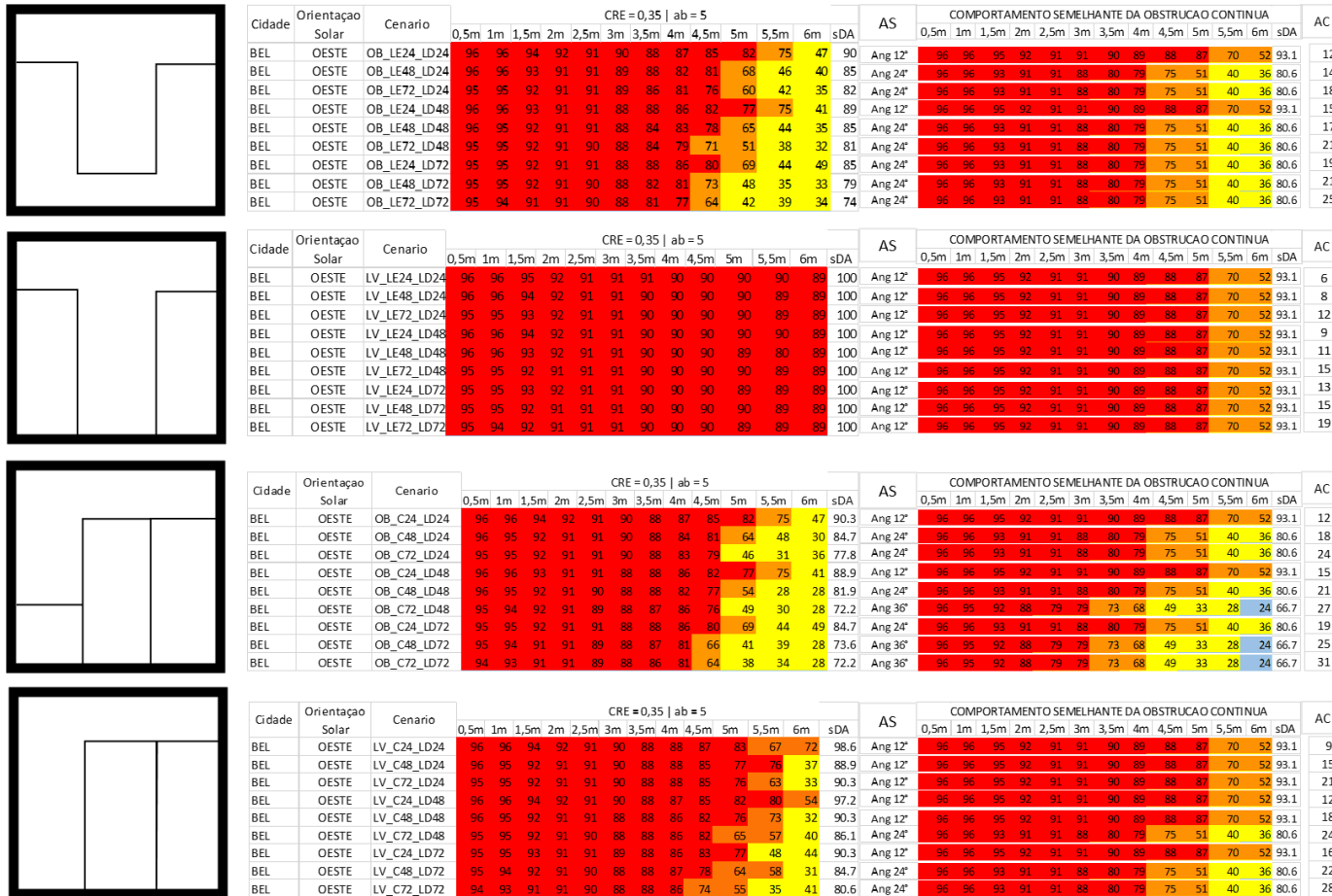
Figura 142 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Leste



Fonte: Autora (2020)



Figura 143 - Análise do comportamento semelhante entre cenários urbanos – Distribuição de Autonomia de Luz Natural (DA200) ao Longo do Eixo Central do Ambiente - Belém Oeste



Fonte: Autora (2020)

