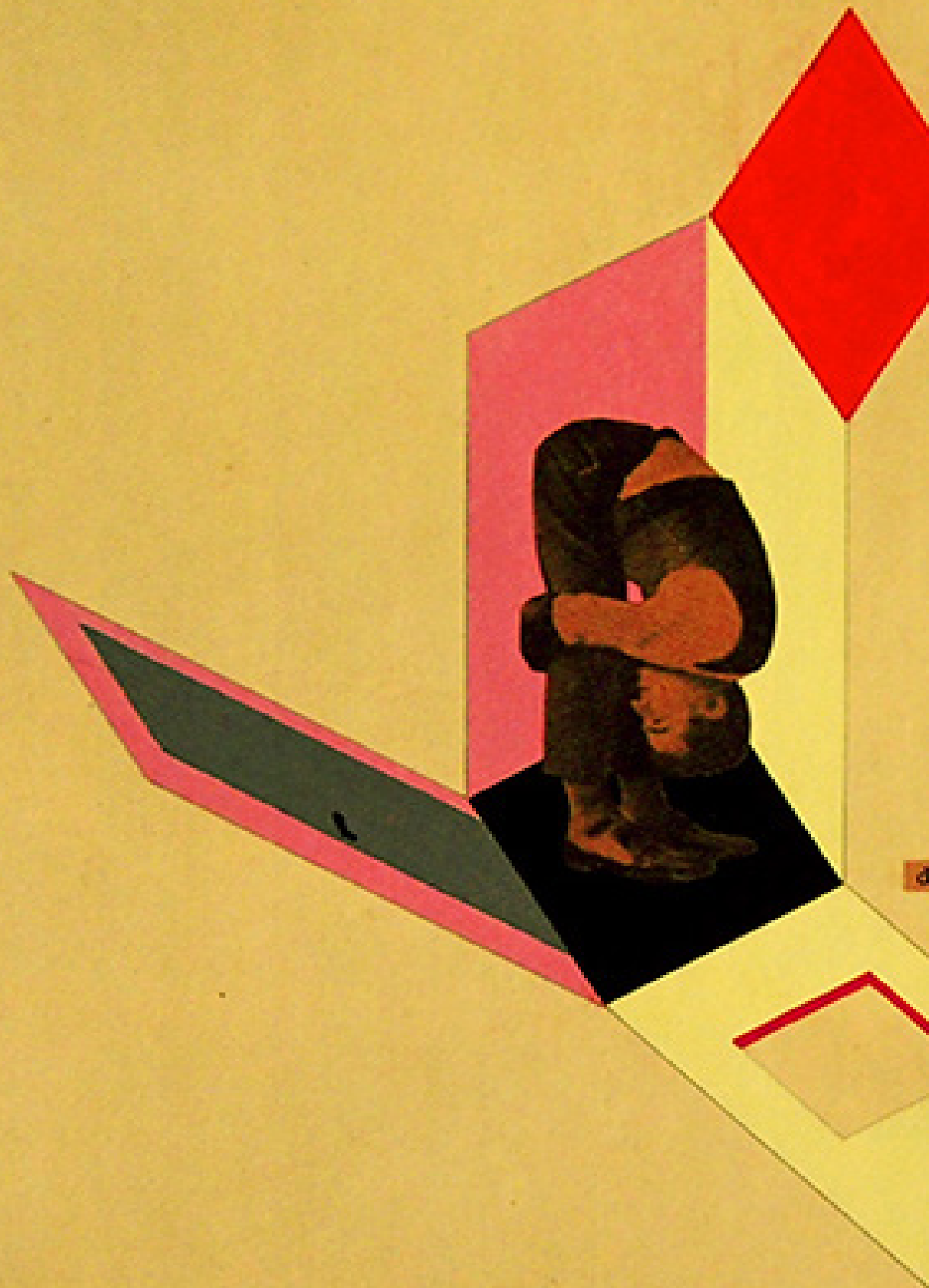


**DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONFORTO
TERMO-LUMINOSO PARA APLICAÇÃO EM
ETAPA INICIAL DO PROCESSO DE PROJETO DE
MICROAPARTAMENTOS.**

Carolina Carvalho Leme

FAUUSP, São Paulo
2023



"A dificuldade reside precisamente no facto de um mínimo aceitável ser sempre o limiar do absoluto inaceitável."

(MONTEIRO, 1998)

24

silhouette



ie mindestwohnung

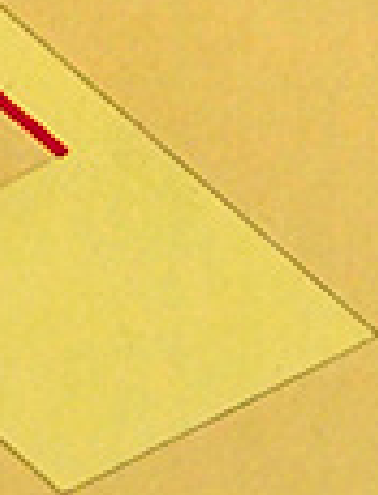


Figura a.1 | Minimal Dwelling project; Albrecht Heubner Fonte: MoMa (<https://www.moma.org/collection/works/140>)

DB: 28

**Tese apresentada à
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da
Universidade de São Paulo, FAUUSP**

**Área de Concentração:
Tecnologia da Arquitetura
Linha de Conforto Ambiental**

**Orientador Prof. Dr Leonardo Marques Monteiro
Co-orientadora Profa. Dra Joana Carla S. Gonçalves**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

**DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONFORTO TERMO-LUMINOSO
PARA APLICAÇÃO EM ETAPA INICIAL DO PROCESSO DE PROJETO DE
MICROAPARTAMENTOS.**

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL, SOB
RESPONSABILIDADE DA AUTORA (A) E ANUÊNCIA DO (A) ORIENTADOR(A).

A versão original, em formato digital, ficará arquivada na Biblioteca da Faculdade.

São Paulo, 14 de Junho de 2023

Carolina Carvalho Leme

São Paulo
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Leme, Carolina Carvalho

Definição de estratégias de conforto termo-luminoso para aplicação em etapa inicial do processo de projeto de microapartamentos. / Carolina Carvalho Leme; orientador Leonardo Marques Monteiro. coorientador Joana Carla Soares Gonçalves - São Paulo, 2023.

293p.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

1. Microapartamentos. 2. Habitações Compactas. 3. Conforto Térmico. 4. Iluminação Natural. 5. Etapas Iniciais de Projeto. I. Monteiro, Leonardo Marques, orient. II. Gonçalves, Joana Carla Soares, coorient. III. Título.

ERRATA

LEME, C C. **Definição de estratégias de conforto termo-luminoso para aplicação em etapa inicial do processo de projeto de microapartamentos.** 2023. 293p. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
14	28	FAPESP	FAPESP e CAPES
14	29	bolsa 2016/17379-0	bolsa n° de processo 2016/17379-0



Nome: Carolina Carvalho Leme

Título: Definição de estratégias de conforto termo-luminoso para aplicação em etapa inicial do processo de projeto de microapartamentos.

**Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
da Universidade de São Paulo, FAUUSP,
Área de Concentração Tecnologia de Arquitetura,
Linha de Conforto Ambiental**

Aprovado em: _____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Dedicatória

Ao meu pai, minha fonte de inspiração e resiliência

À minha mãe, minha referência de paciência e coragem

Ao meu marido Bruno, pelo incentivo e apoio incondicional

À minha filha Júlia, pela esperança no melhor

Agradecimentos

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr Leonardo Marques Monteiro, por toda sensibilidade, dedicação e inspiração.

À minha co-orientadora professora Dra Joana Carla Soares Gonçalves pelo suporte e carinho com que abraçou esta pesquisa e esta pesquisadora.

Agradecimento especial ao Prof. Dr Alberto Hernandez, que teve contribuição inestimável no desenvolvimento da pesquisa, principalmente na parte de simulação computacional.

Ao Klaus Bode pelos profundos ensinamentos e acolhimento durante o período de minha estadia em Londres.

Aos professores John Mardaljevic e sua equipe de pesquisa, da Loughborough University e ao professor Jan Hense e sua equipe, da Eindhoven University of Technology, pela receptividade e atenção a minha pesquisa durante as visitas às instituições.

Aos professores e à equipe do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da FAUUSP (LABAUT), sobretudo à Prof^ª. Dra. Alessandra Prata, à Prof^ª Dra. Denise Duarte, à Prof^ª Dra Roberta Kronka e ao técnico Ranieri Higa.

Aos colegas e amigos do LABAUT, Paula Rabelo, Marcelo Mello, Eduardo Pizzaro, Aparecida Ghosn, Mônica Marcondes, Letícia Hsiao e Carolina Bley

Aos meus queridos amigos e colega de trabalho e de pós-graduação Samuel Bertrand e Juliana Pellegrini por todo suporte, paciência e ajuda.

Às amigas de FAU e de vida cuja amizade me proporcionou afago emocional, em especial à Carolina Castilho e à Tatiana Tobara que viabilizaram as unidades para os estudos de caso.

Ao meu cunhado Vitor Furlan pela contribuição no tratamento de dados.

À minha família, pela força, compreensão e apoio durante todo o percurso.

À Luciana Soares, pelo cuidado e pelo carinho que dedicou a mim e a minha filha, principalmente durante os momentos mais críticos.

À instituição Weather Shift pelo fornecimento do arquivo climático de cenários futuros.

À FAPESP, pelo financiamento quando esta pesquisa ainda se caracterizava como mestrado, por meio da bolsa 2016/17379-0.

Resumo

Leme, Carolina Carvalho. **Definição de estratégias de conforto termo-luminoso para aplicação em etapa inicial do processo de projeto de microapartamentos. 293p.** Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

A participação dos imóveis compactos na cidade de São Paulo vem crescendo significativamente desde 2013, e em 2021, imóveis com metragem inferior à 45m² representaram 76% do total de lançamentos residenciais na capital paulista. A elevada representatividade das habitações compactas na atual conjuntura imobiliária paulistana acentua estudos voltados a esses novos modelos de moradia. Assim, o objetivo dessa tese é contribuir para a implementação de estratégias de conforto termo-luminoso no início do processo de projeto de microapartamentos. Parte-se da hipótese de que há correlação entre as premissas de implantação (entorno, orientação e posição da unidade no edifício) e os parâmetros de projeto arquitetônico (porcentagem de abertura de fachada, profundidade de planta, pé-direito, ventilação, massa térmica e sombreamento) que permite condicionar uma matriz de avaliação das estratégias de conforto termo-luminoso a ser aplicada na etapa inicial do processo de projeto. Utilizaram-se dois métodos, experimental indutivo em relação aos levantamentos empíricos de variáveis térmicas e luminosas (temperatura do ar, temperatura radiante, umidade relativa e velocidade do ar, iluminância), e experimental dedutivo quanto à validação das simulações computacionais (Energyplus, Radiance e Daysim), ao desenvolvimento do modelo parametrizado e ao tratamento estatístico de dados. A pesquisa fornecerá em relação às unidades estudadas: (I) conjunto de problemáticas quanto ao conforto térmico e luminoso do usuário; (II) avaliação dos casos em estudo; (III) reflexão crítica do desempenho dos microapartamentos contemporâneos. Em relação ao modelo parametrizado: (IV) Metodologia para avaliação de estratégias de conforto termo-luminoso no início do processo de projeto; (V) Matriz de decisão das estratégias de conforto termo-luminoso composta por duas matrizes, de relevância e de interação; (VI) análise e discussão de cenários considerando contextos climáticos futuros.

Palavras-chave: Microapartamentos; Habitações compactas; Conforto térmico; Iluminação Natural; Etapas Iniciais de Projeto

Abstract

Leme, Carolina Carvalho. **Thermal and daylight comfort strategies to apply in the early-stages of microapartment design process. 293p.** Tesis (PhD). Architecture and Urbanism School of University of São Paulo, São Paulo, 2023.

The compact housing in the city of São Paulo has been growing significantly since 2013. In 2021, this the apartments with area less than 45m² represented 76% of the total number of residential launches in the city. The high representativeness of compact housing in the current real estate market of São Paulo accentuates research focused on those new housing models. Thus, the aim of this thesis is to contribute to introduce of thermo-luminous comfort strategies at the early stage of the micro-apartment design process. It starts from the hypothesis that there is a correlation between the urban inputs (surrounds, orientation and the unit into the façade) and the design parameters (WWR, aspect ratio, ceiling height, ventilation, thermal mass and shading) that allows conditioning an assessment matrix of thermo-luminous comfort strategies to be applied in the early-stage of the design process. Two methods were used, inductive experimental in relation to empirical surveys of thermal and luminous variables (air temperature, radiant temperature, relative humidity and air velocity, illuminance), and deductive experimental in relation to the validation of computational simulations (Energyplus, Radiance and Daysim), the development of the parameterized model and the statistical treatment of data. The research will provide, in relation to the studied units: (I) set of problems regarding the user's thermal and daylight comfort; (II) evaluation of the studies cases; (III) critical thinking on the performance of contemporary micro-apartments. Regarding the parametrical model: (IV) Methodology for evaluating thermo-luminous comfort strategies at the early-stage; (V) Decision matrix of thermo-luminous comfort strategies composed of two matrices, relevance and interaction; (VI) analysis and discussion of scenarios considering future climatic contexts.

Keywords: Microapartment; Compact dwellings; Thermal Comfort; Daylight; Early-design

Lista de figuras

FIGURA A.1 / MINIMAL DWELLING PROJECT; ALBRECHT HEUBNER FONTE: MOMA (HTTPS://WWW.MOMA.ORG/COLLECTION/WORKS/140) _____	5
FIGURA 1.1 / ESTRUTURA DA TESE / FONTE: AUTORAL _____	41
FIGURA 2.1 / EDIFÍCIO ANTÔNIO DE PÁDUA SALLES, SÃO PAULO, MEADOS DE 1920 / FONTE: VILLA, 2008 50	
FIGURA 2.2 / EDIFÍCIO COPAN, SÃO PAULO, OSCAR NIEMEYER, 1952./ FONTE: ACERVO COPAN, 2018_	50
FIGURA 2.3 / PLANTAS TIPO KITCHENETTE PROPOSTAS NO EDIFÍCIO COPAN, 1952 FONTE: GALVÃO, 2007 51	
FIGURA 2.4 / PLANTAS EXEMPLOS DE DORMITÓRIO REVERSÍVEL. / FONTE: QUEIROZ, 2008 _____	52
FIGURA 2.5 / EXEMPLO DE CÉLULA INDIVIDUAL E MATRIZ DE ATIVIDADES DO ESPAÇO. FONTE: TEIGE, 2002 _____	54
FIGURA 2.6 / EXEMPLO DE CÉLULA COMO HABITAÇÃO FONTE: TEIGE, 2002 _____	54
FIGURA 2.7 / PLANTA E PERSPECTIVA DA CASA DOMINÓ, LE CORBUSIER / FONTE: CASELLI, 2008 ____	55
FIGURA 2.8 / PERSPECTIVAS CAPSULE HOMES PROJECT, WARREN CHALK. / FONTE: WESTMINSTER.AC.UK_ 57	
FIGURA 2.10 / CO-LIVING LONDRES- DIAGRAMA CONCEITUAL ACIMA E O EDIFÍCIO DE CO-LIVING THE COL- LECTIVE OLD OAK, / FONTE: HTTPS://DOI.ORG/10.17645/UP.V7I1.4805 _____	59
FIGURA 2.12 / COMPACTO ADU EM PORTLAND / FONTE: HTTPS://WWW.PROPELSTUDIO.COM/PROJECT/ SUSTAINABLE-PORTLAND-ADU _____	59
FIGURA 2.11 / MICROAPARTMENT PLANTAS E IMAGEM EM NOVA IORQUE / FONTE: WWW.ARCHDAILY.COM. BR/BR/763437 _____	59
FIGURA 2.13 / SMALL FLAT EM HELSINKI / FONTE: WWW.VUOKRAOVI.COM/VUOKRA-ASUNNOT/ HELSINKI 59	
FIGURA 2.9 / TINY HOUSE MOVIMENT - EXEMPLO / FONTE: HESPRUCE.COM/TINY-HOMES _____	59
FIGURA 3.1 / CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL EM 2021 POR CLASSE / FONTE: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2022) _____	64
FIGURA 3.2 / ESCALA DE SENSAÇÃO TÉRMICA / FONTE: AUTORAL COM BASE NA ASHRAE 55 - 2013 ____	67
FIGURA 3.3 / GRÁFICO DO PMV X PPD / FONTE: SIMSCALE, 2020 _____	67
FIGURA 3.4 / GRÁFICO DO MODELO ADAPTATIVO / FONTE: NICOL ET AL (2012). _____	70
FIGURA 3.5 / GRÁFICO DO MODELO ADAPTATIVO - EUROPEU / FONTE: EN 15251 (2007). _____	70
FIGURA 3.6 / TIPOS DE CÉU / FONTE: LAMBERTS (2016) _____	75
FIGURA 3.7 / EXEMPLOS DE AVALIAÇÕES DINÂMICAS DA ILUMINAÇÃO NATURAL / FONTE: AUTORAL ____	78
FIGURA 3.8 / FAIXA DE ILUMINÂNCIAS ÚTEIS / FONTE: AUTORAL _____	79

FIGURA 3.9 CICLO DE PRODUÇÃO HORMONAL DE ACORDO COM A LUZ DO DIA - SISTEMA CIRCADIANO FONTE: BELLALUCE.COM.BR	82
FIGURA 3.10 CURVA DE MACLEAMY DO PROCESSO DE PROJETO COM AS CURVAS DE OPORTUNIDADE X DE CUSTO DE ALTERAÇÃO FONTE: WWW.DANIELDAVIS.COM/MACLEAMY/	83
FIGURA 3.11 BARREIRAS DA INSERÇÃO DAS FERRAMENTAS BPS NO PROCESSO DE PROJETO FONTE: HENSEN ET AL (2012)	84
FIGURA 3.12 COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM ONE-AT-A-TIME (ESQUERDA) E A GLOBAL DE EXPLORAÇÃO DO ESPAÇO (DIREITA) QUANDO CONSIDERADO APENAS 2 VARIÁVEIS (ACIMA) E 3 VARIÁVEIS (ABAIXO). OS CÍRCULOS VERDES E AMARELOS REPRESENTAM AS SOLUÇÕES FAVORÁVEIS. FONTE: OSTERGARD ET AL (2016)	86
FIGURA 3.13 REVISÃO DAS PESQUISAS NA ÁREA E A RELAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES DESAFIOS DE INSERÇÃO DAS BPS NO INÍCIO DO PROCESSO DE PROJETO FONTE: OSTERGARD ET AL (2016)	88
FIGURA 3.14 FLUXO DE TRABALHO PADRÃO DO MÉTODO ESTATÍSTICO FONTE: OSTERGARD ET AL (2016)	89
FIGURA 3.15 FLUXOGRAMA DA ESTRUTURA PROPOSTA POR OSTERGARD FONTE: OSTERGARD ET AL (2016)	90
FIGURA 3.16 PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO - NBR 15575:2021 FONTE: ABNT NBR 15575 (2021)	95
FIGURA 3.17 GRÁFICO DO TOTAL DE UNIDADES RESIDENCIAIS LANÇADAS ANUALMENTE NA CIDADE DE SÃO PAULO POR TIPO. FONTE: ANUÁRIO DO MERCADO IMOBILIÁRIO DA SECOVI (2021)	96
FIGURA 3.18 GRÁFICO DOS LANÇAMENTOS EM 2021 DAS UNIDADES RESIDENCIAIS E NÃO-RESIDENCIAIS. FONTE: ANUÁRIO DO MERCADO IMOBILIÁRIO DA SECOVI (2021)	97
FIGURA 4.1 QUADRO RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS ARQUITETÔNICAS DOS ESTUDOS DE CASOS. FONTE: AUTORAL	103
FIGURA 4.2 PLANTA E FOTOS DA MEDIÇÃO NAS UNIDADES FONTE: AUTORAL	108
FIGURA 4.3 COMPOSIÇÃO DE ANÁLISES DO ENTORNO DOS EDIFÍCIOS DOS ESTUDOS DE CASOS. PLANTA DO PAVIMENTO TIPO, IMAGEM DA FACHADA, IMAGEM AÉREA DO GOOGLE MAPS 2018, MÁSCARA DO ENTORNO PRODUZIDA PELA AUTORA BASEADAS EM ARQUIVO DA MALHA URBANA DE SÃO PAULO OBTIDO NO CESAD. FONTE: AUTORAL	112
FIGURA 5.1 DADOS HORÁRIOS DE VELOCIDADE DE VENTO REGISTRADOS EM QUATRO ARQUIVOS CLIMÁTICOS DA CIDADE DE SÃO PAULO FONTE: WESTPHAL, 2020	136
FIGURA 5.2 MUDANÇA NA TEMPERATURA MÉDIA DE SUPERFÍCIE FONTE: IPCC-AR5, 2014	144
FIGURA 5.3 ESTRUTURA DO PROGRAMA ENERGYPLUS. FONTE: ENERGYPLUS HANDBOOK, 2020	147
FIGURA 5.4 MODELO TRIDIMENSIONAL PARA SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL PELO RADIANCE/DAYSIM. FONTE: AUTORAL	155
FIGURA 5.5 MODELO BASE TRIDIMENSIONAL DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISES DE SENSIBILIDADE. FONTE: AUTORAL	156

TE: AUTORAL _____	160
FIGURA 6.1 / FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA / FONTE: AUTORAL	174
FIGURA 6.2 / QUADRO SÍNTESE DA CONSTRUÇÃO DA COMBINAÇÃO DOS CENÁRIOS / FONTE: AUTORAL	179
FIGURA 6.4 / MODELO ADAPTATIVO REPRESENTANDO A FAIXA PARA TEMPERATURA DE DESCONFORTO POR FRIO DE ADAPTAÇÃO / FONTE: AUTORAL _____	181
FIGURA 6.3 / DIFERENÇA ENTRE MÉDIA, MEDIANA E MODA NA DISTRIBUIÇÃO ASSEMÉTRICA / FONTE: WWW.LINKEDIN.COM/PULSE/ _____	181
FIGURA 6.5 / ROTEIRO DA MODELAGEM PARAMETRIZADA NO GRASSHOPPER / FONTE: AUTORAL _____	182
FIGURA 6.6 / FLUXO DE TRABALHO DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO GENERATIVA / FONTE: AUTORAL _____	183
FIGURA 7.1 / FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA - POSMODELAGEM/ FONTE: AUTORAL _____	188
FIGURA 7.2 / FLUXOGRAMA DO TRATAMENTO ESTATÍSTICO / FONTE: AUTORAL _____	189
FIGURA 7.3 / EXEMPLOS DE RANK DOS COEFICIENTES PADRONIZADOS (SRRC) E DOS COEFICIENTES PADRONIZADOS DA REGRESSÃO (SRC) / FONTE: AUTORAL _____	190
FIGURA 7.5 / GRÁFICOS DA REGRESSÃO MULTIVARIADA IMPACTO E INTERAÇÃO / FONTE: AUTORAL OBTIDO PELO PROGRAMA MINITAB _____	191
FIGURA 7.4 / EXEMPLOS DE MUDANÇA NO R-QUADRADO / FONTE: AUTORAL OBTIDO PELO PROGRAMA MINITAB _____	191
FIGURA 7.6 / GRÁFICOS DE PARETO / FONTE: AUTORAL OBTIDO PELO PROGRAMA MINITAB _____	192
FIGURA 7.7 / ANÁLISES DE DADOS DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO / FONTE: AUTORAL OBTIDO PELO PROGRAMA MINITAB _____	193
FIGURA 7.8 / GRÁFICO DOS PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL _____	194
FIGURA 7.9 / HISTOGRAMAS COMPARATIVO DOS RESULTADOS ANTES E APÓS APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE / FONTE: AUTORAL OBTIDO PELO PROGRAMA MINITAB _____	194
FIGURA 7.10 / APRESENTAÇÃO DAS MATRIZES DE DECISÃO: RELEVÂNCIA E INTERAÇÃO / FONTE: AUTORAL	196
FIGURA 7.11 / DESCRIÇÃO DA ORGANIZAÇÃO DA MATRIZ DO GRAU DE RELEVÂNCIA / FONTE: AUTORAL	197
FIGURA 7.12 / LEGENDA EXPLICATIVA DOS IDEOGRAMAS DA MATRIZES DE DECISÃO DO GRAU DE RELEVÂNCIA / FONTE: AUTORAL _____	198
FIGURA 7.13 / MATRIZ DE DECISÃO DE INTERAÇÃO E DESCRIÇÃO DE COMO APLICAR E INTERPRETAR OS GRÁFICOS INSERIDOS / FONTE: AUTORAL _____	199
FIGURA 8.1 / HISTOGRAMAS RESULTANTES DAS SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO. A ESQUERDE ANTES DAS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE. A DIREITA, APÓS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, EM QUE RESULTOU EM TODOS OS CENÁRIOS ACIMA DE 0.67 DE D.I / FONTE: AUTORAL _____	214
FIGURA 8.2 / EDIFÍCIO ORIGINAL VS OTIMIZADO / FONTE: AUTORAL _____	220
FIGURA 8.3 / DIAGRAMA COMPARATIVO ENTRE EDIFÍCIO ORIGINAL E OTIMIZADO / FONTE: AUTORAL _____	221
FIGURA 8.4 / CARTILHA ORIENTATIVA DAS ESTRATÉGIAS PASSIVAS PARA CONFORTO TERMO LUMINOSO -	

Lista de Gráficos

GRÁFICO 1.1 / LANÇAMENTO DE IMÓVEIS RESIDENCIAIS VERTICALIZADOS EM SÃO PAULO - POR ÁREA ÚTIL FONTE AUTORAL BASEADO EM DADOS DE CAMPO E O DEPARTAMENTO DE ECONOMIA DA SECOVI – 2016 _____	37
GRÁFICO 1.2 / PARTICIPAÇÃO DOS MICROAPARTAMENTOS NOS LANÇAMENTOS DE UNIDADES RESIDENCIAIS COM ATÉ 45M ² ENTRE 2011 – 2015, NA CIDADE DE SÃO PAULO./ FONTE AUTORAL _____	38
GRÁFICO 1.3 / DISTRIBUIÇÃO NA MALHA URBANA DOS MICROAPARTAMENTOS DE PLANTA LIVRE COM ATÉ 45M ² - LANÇADOS ENTRE 2011 E 2015, NA CIDADE DE SÃO PAULO / FONTE AUTORAL _____	39
GRÁFICO 4.1 / PERFIL CLIMÁTICO DA CIDADE DE SÃO PAULO / FONTE AUTORAL ELABORADA NO WEBSITE CBE _____	115
GRÁFICO 4.2 / INTERVALO DAS TEMPERATURAS DE AR EXTERNA E INTERNAS _____	117
GRÁFICO 4.3 / INTERVALO DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS E TAR EXTERNA _____	117
GRÁFICO 4.4 / CURVA DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, TAR EXTERNA E RADIAÇÃO GLOBAL _____	118
GRÁFICO 4.5 / CURVA DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS E TAR EXTERNA, VELOCIDADES DE AR INTERNAS E ZONA DE CONFORTO ADAPTATIVO. _____	119
GRÁFICO 4.6 / MODELO ADAPTATIVO ASHRAE-55 2019 – CADA UNIDADE. _____	121
GRÁFICO 4.7 / ILUMINÂNCIAS EXTERNAS (LUX) _____	122
GRÁFICO 4.8 / ILUMINÂNCIAS INTERNAS (LUX) E FAIXA DE UDI (300 -3000 LUX) _____	123
GRÁFICO 4.9 / ILUMINÂNCIAS INTERNAS (LUX) EM DIAS TÍPICOS DE CÉU ENCOBERTO E CÉU CLARO. _____	124
GRÁFICO 4.10 / AVALIAÇÃO DO CONFORTO ADAPTATIVO (ASHRAE-55) EM DIAS TÍPICOS DE VERÃO E INVERNO. _____	127
GRÁFICO 4.11 / AVALIAÇÃO DO CONFORTO ADAPTATIVO (ASHRAE-55) DURANTE O PERÍODO NOTURNO - SONO. _____	127
GRÁFICO 5.1 / CORRELAÇÃO ENTRE UMIDADE RELATIVA (UR), RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL E TEMPERATURA DE BULBO SECO (TBS) _____	135
GRÁFICO 5.2 / VELOCIDADE DE VENTO (M/S) HORÁRIA DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS SWERA x TMY _____	137
GRÁFICO 5.3 / VELOCIDADES DE VENTO DIÁRIAS - MÉDIAS - DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS SWERA x TMY _____	138
GRÁFICO 5.4 / RADIAÇÃO GLOBAL HORÁRIA DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS SWERA x TMY 2004-2018 _____	138
GRÁFICO 5.5 / RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DIFUSA MÉDIAS DIÁRIAS DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS SWERA x TMY 2004-2018 _____	139
GRÁFICO 5.6 / TEMPERATURAS DE AR (TBS) DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS SWERA x TMY 2004-2018 _____	139
GRÁFICO 5.7 / COMPARATIVO ENTRE AS MÉDIAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DAS TEMPERATURAS DE AR DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS SWERA x TMY E DO ANO DE MEDIÇÃO DE REFERÊNCIA (2017-2018) _____	140
GRÁFICO 5.8 / COMPARATIVO ENTRE AS TEMPERATURAS DE AR DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS SWERA x	

<i>TMY E DO ANO DE MEDIÇÃO DE REFERÊNCIA (2017-2018)</i>	140
GRÁFICO 5.9 <i>CORRELAÇÃO ENTRE UMIDADE RELATIVA (UR), RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL E TEMPERATURA DE AR (TBS) – ARQUIVO CLIMÁTICO ANO DE REFERÊNCIA DE MEDIÇÃO (2017-2018).</i>	141
GRÁFICO 5.10 <i>DISPERSÃO DOS DADOS DE RADIAÇÃO (A) E TEMPERATURA DE AR (B) NA CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS SIMULADOS X COLETADOS (INMET) 2017/2018</i>	142
GRÁFICO 5.11 <i>COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE TEMPERATURA DE AR E DA RADIAÇÃO GLOBAL DOS DADOS SIMULADOS X COLETADOS (INMET) DURANTE O PERÍODO DE MEDIÇÃO (2017/2018)</i>	142
GRÁFICO 5.12 <i>AUMENTO ESTIMADO DA TEMPERATURA MÉDIA DE SUPERFÍCIE DE ACORDO COM OS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (FONTE IPCC-AR5, 2014)</i>	143
GRÁFICO 5.13 <i>MUDANÇA NA TEMPERATURA MÉDIA PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 PARA REGIÃO SUDESTE DA AMÉRICA DO SUL</i>	144
GRÁFICO 5.14 <i>CURVA DE TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS (TBS) PARA CENÁRIOS ATUAL E FUTUROS (RCP8.5).</i>	145
GRÁFICO 5.16 <i>CURVA DE TEMPERATURAS DAS MÉDIAS DAS MÁXIMAS E DAS MÉDIAS DAS MÍNIMAS (TBS) PARA CENÁRIOS ATUAL E FUTUROS (RCP8.5).</i>	145
GRÁFICO 5.15 <i>PERFIS DE TEMPERATURA (TBS) PARA CENÁRIOS ATUAL E FUTUROS (RCP8.5).</i>	145
GRÁFICO 5.17 <i>GRÁFICOS DE DISPERSÃO POR CENÁRIO, CONSIDERANDO A AMOSTRA TOTAL (AMOSTRA DE 3936 DADOS COLETADOS)</i>	150
GRÁFICO 5.18 <i>GRÁFICO DE ERROS DA AMOSTRA TOTAL (MÁXIMAS, MÍNIMAS E DISTRIBUIÇÃO DE 95%).</i>	151
GRÁFICO 5.19 <i>GRÁFICOS DAS CURVAS DE TEMPERATURA DE AR INTERNA PARA CADA UNIDADE.</i>	152
GRÁFICO 5.20 <i>GRÁFICOS DE DISPERSÃO ENTRE ILUMINÂNCIAS MEDIDAS X SIMULADAS.</i>	156
GRÁFICO 5.21 <i>CURVAS DIÁRIAS DA LUZ NATURAL PARA OS DIAS TÍPICOS DE VERÃO E INVERNO.</i>	157
GRÁFICO 5.22 <i>MAPA DE HIERARQUIA DO CONFORTO ADAPTATIVO (80% DE ACEITABILIDADE – ASHRAE 55) DAS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DE TÉRMICA (24 TESTES).</i>	164
GRÁFICO 5.23 <i>MAPA DE HIERARQUIA DE DESCONFORTO POR CALOR (80% DE ACEITABILIDADE – ASHRAE 55) DAS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DE TÉRMICA (24 TESTES).</i>	164
GRÁFICO 5.24 <i>MAPA DE HIERARQUIA DE DESCONFORTO POR FRIO (80% DE ACEITABILIDADE – ASHRAE 55) DAS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DE TÉRMICA (24 TESTES).</i>	165
GRÁFICO 5.25 <i>GRÁFICO DE ERROS DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS (MÁXIMAS, MÍNIMAS E DISTRIBUIÇÃO DE 95%).</i>	166
GRÁFICO 5.26 <i>MAPA DE HIERARQUIA DE UDI (100-3000LUX) DAS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DE ILUMINAÇÃO (26 TESTES).</i>	167

GRÁFICO 5.27 <i>GRÁFICO DAS COVARIÂNCIA ENTRE O MODELO BASE E OS CENÁRIOS DE SENSIBILIDADE.</i>	167
GRÁFICO 5.28 <i>GRÁFICO DE ERROS DAS ILUMINÂNCIAS ÚTEIS, UDI 100-3000LUX (MÁXIMAS, MÍNIMAS E DISTRIBUIÇÃO DE 95%).</i>	168
GRÁFICO 8.1 <i>CORRELAÇÃO ENTRE DESEMPENHO INTEGRADO (DI), LUMINOSOS (UDI) E TÉRMICO (HORAS DE CONFORTO - HC)</i>	205
GRÁFICO 8.2 <i>DISTRIBUIÇÃO E DISPERSÃO DOS PERCENTUAIS DE HORAS EM UDI E EM CONFORTO TÉRMICO (HC)</i>	206
GRÁFICO 8.3 <i>COMPARATIVO ENTRE OS DIFERENTES PESOS DE LUMINOSO E TÉRMICA DO D.I D.I-50 E D.I-70</i>	207
GRÁFICO 8.4 <i>DISTRIBUIÇÃO DOS DESCONFORTO POR CALOR E POR FRIO</i>	208
GRÁFICO 8.6 <i>GRÁFICO DE PARETO DO IMPACTO DOS PARÂMETROS</i>	208
GRÁFICO 8.5 <i>DISTRIBUIÇÃO DOS DESCONFORTO LUMINOSO (ABAIXO DE 100LUX E ACIMA 3000LUX)</i>	208
GRÁFICO 8.7 <i>MÁXIMAS, MÉDIA E MÍNIMAS DAS TAXAS DE RENOÇÃO DE AR POR HORA (ACH)</i>	208
GRÁFICO 8.8 <i>SRRC DO DESEMPENHO INTEGRADO - TOTALIDADE DOS CENÁRIOS</i>	209
GRÁFICO 8.9 <i>SRRC DE TÉRMICA (HC) E DE LUMINOSO (UDI) - TOTALIDADE DOS CENÁRIOS</i>	209
GRÁFICO 8.10 <i>MAPA DE CALOR DO D.I DE ACORDO COM A INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE IMPLANTAÇÃO</i>	211
GRÁFICO 8.11 <i>GRÁFICOS DA REGRESSÃO MULTIVARIADA - INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE IMPLANTAÇÃO</i>	211
GRÁFICO 8.12 <i>GRÁFICOS DA REGRESSÃO MULTIVARIADA - INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS ARQUITETÔNICOS</i>	212
GRÁFICO 8.13 <i>MAPA DE CALOR DO D.I DE ACORDO COM A INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS ARQUITETÔNICOS</i>	213
GRÁFICO 8.14 <i>GRÁFICO DOS IMPACTOS DOS PARÂMETROS - SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO</i>	214
GRÁFICO 8.15 <i>DISTRIBUIÇÃO DOS NÍVEIS DE DESEMPENHO INTEGRADO POR CASOS</i>	215
GRÁFICO 8.16 <i>GRÁFICOS DE CONTORNO DO DESCONFORTO LUMINOSO POR CASOS</i>	215
GRÁFICO 8.17 <i>DISTRIBUIÇÃO DAS HORAS EM CONFORTO E EM DESCONFORTO</i>	216
GRÁFICO 8.18 <i>GRÁFICO DA SÉRIE DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS MÁXIMAS E MÍNIMAS</i>	216
GRÁFICO 8.19 <i>GRÁFICO DA IMPORTÂNCIA (PARETO) E MAGNITUDE DOS PARÂMETROS (SRRC)</i>	217
GRÁFICO 8.20 <i>GRÁFICO DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS ARQUITETÔNICOS - CASO 1</i>	218
GRÁFICO 8.21 <i>GRÁFICO DO MODELO ADAPTATIVO (ASHRAE-55) - CENÁRIOS PRESENTES E FUTUROS</i>	228
GRÁFICO 8.22 <i>GRÁFICO DOS PERCENTUAIS DE CONFORTO E DESCONFORTO - CENÁRIOS PRESENTES E</i>	

Lista de Tabelas

TABELA 4.1 / ALTURA DOS SENSORES PARA MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS (ISO 7726, 2001, ADAPTADA PELA AUTORA)	104
TABELA 4.2 / ESPECIFICAÇÕES DOS INSTRUMENTOS PARA TIPO C (CONFORTO) - (ISO 7726, 20012001, ADAPTADA PELA AUTORA)	104
TABELA 4.3 / CARACTERIZAÇÃO DOS PERÍODOS DE MEDIÇÕES	106
TABELA 4.4 / ESPECIFICAÇÕES DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS NAS MEDIÇÕES	106
TABELA 4.5 / ESTUDOS DAS MÁSCARAS DE SOMBREAMENTO DAS ABERTURAS	113
TABELA 4.6 / ANÁLISE DO CONFORTO ADAPTATIVO ASHRAE-55 DE CADA UNIDADE MEDIDA.	121
TABELA 4.7 / PORCENTAGEM DE ILUMINÂNCIAS ÚTEIS DA LUZ DO DIA (UDI 300- 3000LUX)	125
TABELA 5.1 / PARÂMETROS DE ENTRADA CONFIGURADOS PARA AS SIMULAÇÕES NO ENERGYPLUS	148
TABELA 5.2 / CONFIGURAÇÕES DOS CENÁRIOS DOS ESTUDOS DE ADERÊNCIA	149
TABELA 5.3 / REGRESSÃO ENTRE AS TEMPERATURAS DE AR INTERNAS SIMULADAS E MEDIDAS (R^2)	151
TABELA 5.4 / TAXAS DE RENOVAÇÃO DO AR POR HORA (ACH) – APENAS NO PERÍODO COM ABERTURA	151
TABELA 5.5 / PARÂMETROS DE ENTRADA CONFIGURADOS PARA AS SIMULAÇÕES NO DAYSIM E RADIANCE	155
TABELA 5.6 / UDI – ILUMINÂNCIAS ÚTEIS (300 – 3000 LUX)	157
TABELA 5.7 / CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICA DO MODELO BASE	160
TABELA 5.8 / PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO BASE	161
TABELA 5.9 / PARÂMETROS DE SAÍDA DO MODELO BASE	162
TABELA 5.10 / QUADRO SÍNTESE DOS CENÁRIOS	162
TABELA 6.1 / QUADRO SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA FIXOS E VARIÁVEIS	175
TABELA 6.2 / PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE MASSA TÉRMICA E CONDUTÂNCIA	178
TABELA 6.3 / QUADRO SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE SAÍDA	180
TABELA 6.4 / RESTRIÇÕES IMPOSTAS À FUNÇÃO OBJETIVO	184
TABELA 7.1 / QUADRO DESCRITIVO DOS CASOS	195
TABELA 7.2 / PERCENTUAIS DE OCORRÊNCIA DE CENÁRIOS VÁLIDOS POR CASOS	195
TABELA 7.3 / PERCENTUAIS DE OCORRÊNCIA NEUTRO DE ACORDO COM A QUANTIDADE DE SOLUÇÕES DE CADA PARÂMETRO	197
TABELA 8.1 / DISTRIBUIÇÃO DO DESEMPENHO INTEGRADO POR CASOS	206
TABELA 8.2 / QUADRO DESCRITIVO DOS CASOS	215
TABELA 8.3 / PERCENTUAL DE HORAS EM DESCONFORTO POR CALOR (ANOS - FUTURO)	229

Sumário

1. INTRODUÇÃO	33
1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA	35
1.1.1. MAPEAMENTO DA TIPOLOGIA	36
2. HABITAÇÃO MÍNIMA VERTICALIZADA	47
2.1. A VERTICALIZAÇÃO DA HABITAÇÃO COLETIVA BREVE CONTEXTO	48
2.2. HABITAÇÃO SÃO PAULO E A VERTICALIZAÇÃO	49
2.3. HABITAÇÃO HABITAÇÕES MÍNIMAS	53
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
3. EMBASAMENTO TEÓRICO	63
3.1. ARQUITETURA ADAPTADA AO CLIMA	65
3.2. CONFORTO TÉRMICO	66
3.2.1. MODELO ADAPTATIVO - ASHRAE 55 (2013)	69
3.2.2. MODELO ADAPTATIVO - EN 15251 (2007)	70
3.2.3. CONFORTO TÉRMICO EM RESIDÊNCIAS	72
3.3. CONFORTO LUMINOSO	74
3.3.1. CONFORTO LUMINOSO MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO	76
3.3.2. QUESTÕES BIOLÓGICAS RELACIONADAS A ILUMINAÇÃO NATURAL	81
3.4. PROCESSO INTEGRADO (IDP) E TOMADA DE DECISÕES EM FASES INICIAIS DE PROJETO (MAKING DECISION IN EARLY-DESIGN)	83
3.4.1. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	90
3.4.2. MODELAGEM PARAMETRIZADA	92
3.5. LEGISLAÇÕES E NORMATIVAS	93
4. LEVANTAMENTOS DE CAMPOS	101
4.1. ETAPA 1 DELINEAMENTO DAS AMOSTRAS DOS ESTUDOS DE CASOS	102
4.2. ETAPA 2 CARACTERIZAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS DE CAMPOS	104
4.2.1. DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS	106

4.3. ETAPA 3 TRATAMENTO DE DADOS	108
4.4. ETAPA 4 ANÁLISES TÉRMICA E LUMINOSA	111
4.4.1. ABORDAGEM PROJETUAL	111
4.4.2. ABORDAGEM AMBIENTAL TÉRMICA	115
4.4.3. ABORDAGEM AMBIENTAL LUMINOSA	122
4.5. ETAPA 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	126
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
5. PRÉ-MODELAGEM	133
5.1. INTRODUÇÃO	134
5.2. ARQUIVO CLIMÁTICO	134
5.2.1. VARIÁVEL AMBIENTAL VELOCIDADE DE AR	136
5.2.2. VARIÁVEL AMBIENTAL RADIAÇÃO SOLAR	138
5.2.3. VARIÁVEL AMBIENTAL TEMPERATURA DE AR (TBS)	139
5.2.4. CONSTRUÇÃO DO ARQUIVO CLIMÁTICO DO ANO DE MEDIÇÃO	141
5.2.5. ARQUIVO CLIMÁTICO FUTUROS.	142
5.3. VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	146
5.3.1. SIMULAÇÕES DE TÉRMICA	146
5.3.2. SIMULAÇÕES DE ILUMINAÇÃO NATURAL	154
5.3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	158
5.4. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE LOCAL	159
5.4.1. TÉCNICA DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	159
5.4.1.1. MODELO BASE	160
5.4.1.2. CENÁRIOS	162
5.4.1.3. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE LOCAL - TÉRMICA	163
5.4.1.4. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE LOCAL - LUMINOSA	166
5.4.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS	169

6. MODELAGEM	173
6.1. INTRODUÇÃO	174
6.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	175
6.2.1. DETALHAMENTO DOS PARÂMETROS FIXOS	177
6.2.2. DETALHAMENTO DOS PARÂMETROS VARIÁVEIS	177
6.2.3. DETALHAMENTO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA	180
6.2.4. CONSTRUÇÃO DO MODELO MULTIOBJETIVO PARAMETRIZADO	182
6.2.5. COLETA DE DADOS E FORMULAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO	183
7. PÓS-MODELAGEM	187
7.1. INTRODUÇÃO	188
7.2. ETAPA 1 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	189
7.2.1. REGRESSÕES MULTIVARIADAS	190
7.2.2. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	192
7.2.3. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	193
7.3. ETAPA 2 CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE DECISÃO	194
7.3.1. MATRIZ DE DECISÃO DE RELEVÂNCIA	196
7.3.2. MATRIZ DE DECISÃO DE INTERAÇÃO	198
7.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	200
8. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	203
8.1. INTRODUÇÃO	204
8.2. DISCUSSÃO AMBIENTAL	204
8.2.1. DISCUSSÃO AMBIENTAL POR CASOS	214
8.3. DISCUSSÃO PROJETUAL	219
8.4. CENÁRIOS FUTUROS	227
8.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	233

9. CONCLUSÃO	235
9.1. VALIDAÇÃO DA HIPÓTESE	236
9.2. PRODUTOS	237
9.3. LIMITAÇÕES E DESDOBRAMENTOS	239
10. BIBLIOGRAFIA	241
11. APÊNDICE	251

1. Introdução

A relação entre as pessoas e o meio é complexa e ativa, condicionada pelo tempo, clima, edifício, condição social, econômica e outros fatores que também interagem com o meio físico (NICOL, 2012). No atual contexto de acelerada urbanização, adensamento e mudanças climáticas a complexa dinâmica do ser humano com o meio é amplificada. A elevação das temperaturas e a intensificação das ocorrências de eventos climáticos extremos (secas prolongadas, inundações, epidemias, ondas de frio e calor) tendem a piorar as condições de conforto térmico, potencializando problemas de saúde e mortalidade, principalmente entre os grupos mais vulneráveis, como crianças e idosos. Segundo Santamouris (2014), o aquecimento urbano tem sérias consequências no equilíbrio energético, ambiental e social das cidades, além de estar associado ao aumento da concentração de poluentes urbanos e da pegada ecológica urbana.

Ademais, de acordo com os indicadores do Banco Mundial, estima-se que cerca de 70% da população mundial estará concentrada em centros urbanos e 85% em países subdesenvolvidos até 2030. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2022, 85% da população brasileira localiza-se em área urbana, sendo a maior concentração verificada na região sudeste, com 93% da população. Tal crescimento tem impulsionado o aumento da densidade urbana das edificações, principalmente no centro da cidade, influenciando as características dos ambientes internos que estão cada vez mais dependentes de sistemas artificiais para operar satisfatoriamente (Lamberts, 2015).

Nas últimas décadas, o aumento do valor da terra e as mudanças estruturais que têm ocorrido no núcleo familiar estão influenciando os espaços residenciais e fomentado a produção de habitações mínimas nos grandes centros urbanos. Atualmente, muitos indivíduos preferem morar em espaços reduzidos, pouco fragmentado, flexíveis e situados em regiões com infraestrutura urbana consolidada que garantam melhor qualidade de vida. A Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (Pnad Contínua) de 2022, elaborada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), atestou que em dez anos houve um aumento de 43,7% das residências unipessoais, passando de 7,5 milhões em 2020, para 10,8 milhões em 2021.

Em resposta a esta crescente demanda de moradia conceitos inovadores para um morar menor tem aparecido em múltiplas cidades (COHEN, 2021) como alternativas mais viáveis em regiões centrais, popularizadas nos atuais microapartamentos. Apesar de questionáveis, são perceptíveis as tentativas do setor imobiliário em responder às demandas dessa nova população mais eclética e plural, que exigem respostas inovadoras e originais às questões ambientais, sociais e econômicas.

Logo, torna-se imperativo que arquitetos e engenheiros ao pensar em maneiras conjuntas de melhorar o conforto ambiental do usuário e o desempenho dos edifícios considerem que as pessoas passam entre 80% a 90% de seus dias em ambientes fechados (LAMBERTS, 2015). Ainda, tendo em vista os graves problemas ambientais enfrentados

pelo nosso planeta, a introdução de uma cultura arquitetônica, que considere relevante as condicionantes ambientais, parece urgente e atual (BITTENCOURT, 2015).

Contudo, a crescente complexidade do processo de projeto de edifícios modernos tem fomentado conhecimentos especializados que, apesar de responderem às demandas tecnológicas, afastam-se da concepção espacial e arquitetônica do ambiente construído. As questões ambientais quando tratadas como elementos constituintes do partido de projeto e do exercício da arquitetura demonstram-se mais eficientes do que quando abordadas como sistemas adjacentes ao desenho do espaço. Assim, a elaboração de instrumentos projetuais que fomentem a inserção das condicionantes de conforto termo-luminoso no início do processo de projeto é uma importante contribuição à promoção de espaços residenciais compactos com melhor qualidade ambiental, eficiência energética e menor emissão de carbono.

1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA

Edifícios altos de apartamentos tem sido solução usual nas metrópoles brasileiras, constituindo uma tipologia que, se por um lado, não sofreu modificações essenciais, por outro, tem originado novas possibilidades de habitação para uma população em contínuo processo de mudança (VILLA e TRAMONTANO, 2012). Segundo Ornstein (2006) até o início da década de 2000 o quadro geral dos modelos habitacionais ofertados pelo mercado imobiliário na maioria das cidades brasileiras não diferiu muito das tipologias consolidadas ao longo do século XX.

Contudo, questões atreladas ao meio ambiente, a fertilidade, ao envelhecimento da população e a complexidade das relações domésticas tem demonstrado o descompasso entre o estoque de moradias e as necessidades residenciais (COHEN, 2021). Nas últimas duas décadas, as habitações mínimas deixaram de ser tratadas como espaços residuais e passaram a estar no foco do mercado imobiliário, principalmente nas grandes metrópoles (RACK, 2016). É alinhado a essa nova conjuntura social que ressurgem os atuais microapartamentos de planta livre paulistanos, leituras contemporâneas das kitchenettes da década de 1950 e 1960, que incorporaram em sua infraestrutura as comodidades e facilidades dos flats.

A recente produção privada de espaços mínimos de moradia é caracterizada por habitações, majoritariamente, entre 14 e 45m², destinadas à classe alta e média, concentradas nos eixos de estruturação urbana. De acordo com dados do anuário do mercado imobiliário da SECOVI, a participação dos imóveis compactos vem crescendo significativamente na cidade de São Paulo. Imóveis com metragem menor que 30 m² de área útil foram responsáveis por 23% das unidades residenciais lançadas (18,5 mil) na Capital em 2021 e 53% do total de lançamentos habitacionais tinham metragem entre 30 m² e 45 m² de área útil. Quanto a distribuição dessa tipologia na malha urbana, os dados da SECOVI

afirmam que a maioria das unidades estão concentradas nos eixos de estruturação urbana, representando 41,2% no total.

Os microapartamentos contemporâneos minimizam o espaço por meio de plantas otimizadas para torná-los os mais eficientes possíveis para seu tamanho, proporcionando uma vida acessível em áreas urbanas (GABBE, 2015). A mínima compartimentação das plantas, além de simplificar e baratear a construção, em teoria, também flexibiliza a diagramação espacial permitindo o desenvolvimento de múltiplas atividades e atendendo a uma maior variedade de usuários. Entretanto, tais habitações, apesar de inovadoras quanto a fragmentação dos ambientes, seguem a tendência do mercado em pasteurizar plantas com baixa qualidade arquitetônica e equívocos quanto implantação, insolação e ventilação, o que intensifica a dependência em sistemas ativos de condicionamento e iluminação para promoção do conforto termo-luminoso.

Apesar da relevância do tema, são muito poucos os estudos que abordam questões de conforto termo-luminoso em espaços mínimos de moradia com planta livre, em âmbito nacional e internacional. No Brasil, apenas o trabalho de avaliação de pós-ocupação de Galvão (2007) e o de Dolce (2018) sobre o COPAN teriam algum paralelo com o assunto, mas não abordam a produção contemporânea. Então, para um entendimento mais assertivo da relevância dessa tipologia no atual contexto imobiliário da cidade de São Paulo, realizou-se um mapeamento dos microapartamentos paulistanos lançados entre 2011 e 2015.

1.1.1. MAPEAMENTO DA TIPOLOGIA

Como não há dados consolidados acerca dos microapartamentos, entende-se que é pertinente o levantamento dessa tipologia no atual contexto imobiliário paulistano. Os órgãos de pesquisa, EMBRAESP e SECOVI, categorizam as unidades residenciais verticalizadas por área ou por quantidade de dormitório, sendo que a menor divisão de área era de 45m² até 2018 e não há categorias inferiores a 1 dormitório. Por isso, foi realizado um mapeamento dos empreendimentos de microapartamentos de planta livre lançados na cidade de São Paulo entre 2011 e 2015.

Para validação do mapeamento e para compreensão do real impacto desses empreendimentos na malha urbana do município foi efetuada uma extrapolação dos dados obtidos pelos órgãos de pesquisa com os dados levantados em campo pela autora. Com o cuidado de gerar informações coerentes à pesquisa, foram estabelecidos alguns critérios em concordância com os utilizados pela SECOVI e EMBRAESP. Critérios:

- 1. LANÇAMENTOS:** foi considerado o ano de lançamento 3 anos anterior ao ano de previsão ou de término da obra. Mesmo critério estabelecido pela SECOVI em suas pesquisas.
- 2. PERÍODO:** apenas empreendimentos lançados entre 2011 e 2015 foram levantados.

Isto devido à confiabilidade das datas de lançamentos. Critério utilizado em pesquisas de mercado da SECOVI.

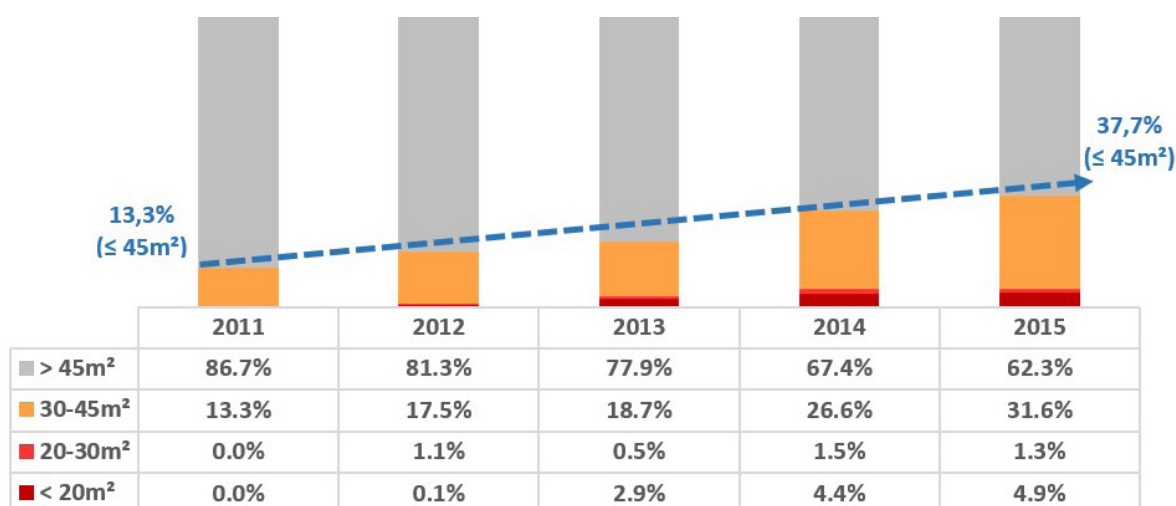
3. **TAMANHO:** Como as intuições que forneceram os dados à pesquisa, tem como menor categoria de metragem 45m², as unidades mapeadas limitaram-se à tal metragem.
4. **FONTES:** As informações de área, unidades e infraestrutura obtidas nos levantamentos da autora foram concedidas pelas construtoras, incorporadoras e imobiliárias por meio de pesquisa de mercado. Portanto, são informações referentes à comercialização desses imóveis, sendo o mesmo critério aplicado pela EMBRAESP e SECOVI.
5. **TIPOLOGIA:** Para fins deste estudo, apenas unidades lançadas como planta livre com até 45m² foram consideradas. Descartou-se unidades lançadas como 1 dormitório.

A partir do mapeamento e da análise dos dados do mercado foi possível verificar a relevância destes empreendimentos no atual panorama da construção civil paulistana e averiguar como estes estão respondendo às novas demandas de mercado. O Balanço do Mercado Imobiliário 2014 da SECOVI indica uma mudança de posicionamento da construção civil residencial, com o aumento expressivo de unidades com até 1 dormitório, que passou de 1% em 2007, aos representativos 34%, em 2014, do total de lançamentos residenciais verticais.

O mesmo comportamento é constatado ao analisar-se o mercado por área útil. Observa-se o crescimento acentuado das unidades com menor área, no qual apartamentos de até 45m² representaram 37,7% do total de unidades lançadas em 2015. Contudo, para uma compreensão mais assertiva do cenário dos microapartamentos foi imperativo fragmentar a categoria de até 45m² em faixas inferiores de área. Assim, averiguou-se que os espaços mínimos de moradia se concentram na faixa de 30 à 45m², representando no período de 2011 – 2015, 84,9% das unidades de até 45m².

Gráfico 1.1 | Lançamento de imóveis residenciais verticalizados em São Paulo - por área útil

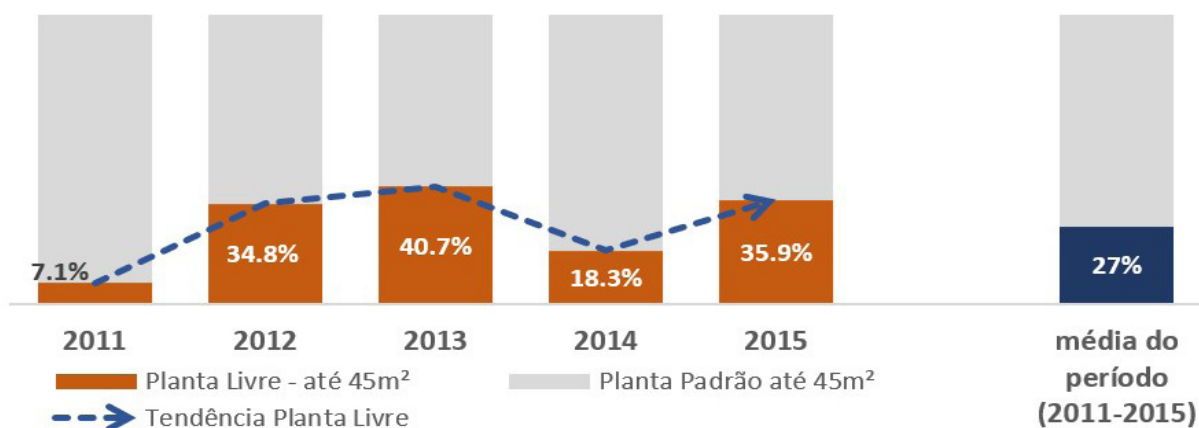
Fonte autoral baseado em dados de campo e o departamento de economia da SECOVI – 2016



Corroborando aos dados do mapeamento, o anuário de 2021 da SECOVI atesta a tendência de maior participação das habitações compactas no quadro geral de lançamentos residenciais da cidade de São Paulo. A partir de 2018 e até 2021 as unidades entre 30 e 45m² representaram mais de 50% do total de lançamentos anuais de residências na capital e 71% das unidades com metragem até a 45m².

Em relação aos microapartamentos de planta livre, ao cruzar os dados da SECOVI com o levantamento realizado pela autora, observou-se que estes representam 36% do total de habitações com até 45m² lançadas entre 2011 e 2015. Na distribuição por faixa de área útil, fica evidente que quanto menor a área, maior a representatividade das unidades com planta livre no total de lançamentos. Entretanto, em volume absoluto, os lançamentos desse tipo de unidade se concentram na faixa entre 30 e 45m² (7228 unidades).

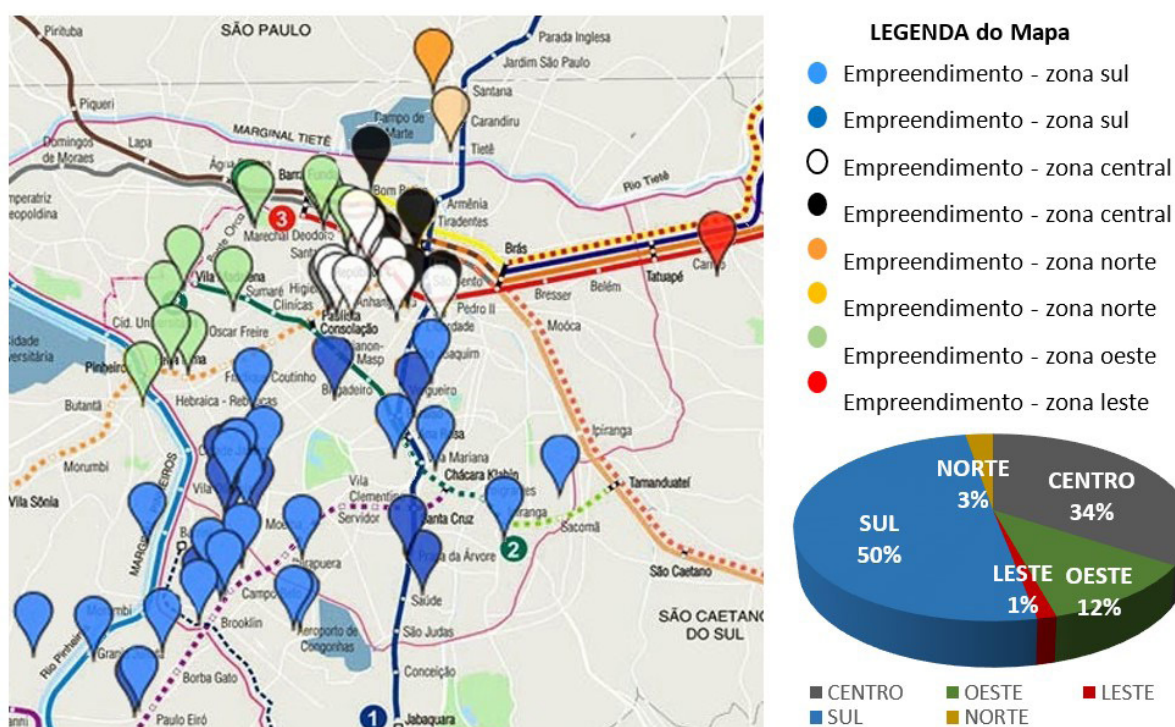
Gráfico 1.2 | Participação dos microapartamentos nos lançamentos de unidades residenciais com até 45m² entre 2011 - 2015, na cidade de São Paulo. | Fonte autoral



Quanto à inserção desses empreendimentos na malha urbana, constatou-se concentração nas regiões dos eixos de estruturação urbana. Movimento oposto ao do mercado, em que das unidades lançadas entre 2012-2014, 81,2%, estão fora dos eixos de estruturação (Balanço do Mercado Imobiliário 2014 – SECOVI). Tais empreendimentos concentram-se, principalmente, nas zonas sul e central.

Na zona sul, a distribuição ocorre ao longo do vetor de expansão do centro financeiro e ao redor da operação urbana Água Espraiadas. Os empreendimentos catalogados nessa região apresentam estética similar ao dos edifícios corporativos, com largos panos de vidro na fachada. Também são caracterizados por edifícios com maior variedade de unidades e de áreas, concentrando-se entre 30 e 45m². No centro, também há uma concordância com a operação urbana e com os eixos de transporte, mas tratam-se de empreendimentos com unidades menores e mais homogêneas, entre 14 e 35m², e alguns de uso misto. O apelo comercial está focado em questões de caráter social e cultural, como mobilidade urbana, versatilidade e democratização das áreas comuns das edificações.

Gráfico 1.3 | Distribuição na malha urbana dos microapartamentos de planta livre com até 45m² - lançados entre 2011 e 2015, na cidade de São Paulo | Fonte autoral



Ainda, a partir 2013 as revisões do código de obras e do plano direto possibilitaram o aumento do poder construtivo por meio da construção de espaços não residenciais. Observou-se então, o aumento expressivo de microapartamentos intitulados de “NR” (não residenciais) na maioria dos empreendimentos residenciais verticalizados da cidade de São Paulo. O anuário de 2021 da SECOVI evidencia tal dinâmica ao citar que dos 861 projetos aprovados, 73% são de uso residencial e 27% de uso misto (residencial e não residencial). Ainda, das 96.826 unidades residenciais aprovadas no ano, 49% estão em empreendimentos de uso misto que contemplam os NRs.

Não obstante, as habitações compactas contribuem significativamente ao adensamento urbano, ao aumento da diversidade de residências e da eficiência energética, aliada à redução de emissão de carbono por minimizar a dependência de veículos e estimular o caminhar. Deste modo, a elevada representatividade dessa tipologia no atual contexto do mercado imobiliário aliado à tendência de compactação das habitações tem enfatizado as mudanças de ocupação e uso do solo, principalmente nas áreas mais adensadas da cidade, o que acentua a importância de estudos voltados a esses novos modelos de habitação.

OBJETIVO

O objetivo da pesquisa é contribuir para a implementação de estratégias de conforto termo-luminoso no início do processo de projeto de microapartamentos.

Pretende-se por meio da correlação das premissas de implantação com os parâmetros do projeto arquitetônico explorar de forma estruturada o universo de soluções a fim de orientar as definições de estratégias de conforto termo-luminosas de microapartamentos no início do processo de projeto.

HIPÓTESE

Parte-se da hipótese de que há correlação entre as premissas de implantação (entorno, orientação e posição da unidade no edifício) e os parâmetros de projeto arquitetônico (porcentagem de abertura de fachada, profundidade de planta, pé-direito, ventilação, massa térmica e sombreamento) que permite condicionar uma matriz de avaliação das estratégias de conforto termo-luminoso a ser aplicada na etapa inicial do processo de projeto.

MÉTODO

A questão central da pesquisa é o conforto termo-luminoso de espaços compactos de planta livre produzidos recentemente na cidade de São Paulo e para a investigação dessa foram adotados dois métodos. O primeiro, experimental indutivo em relação aos levantamentos de campo e o segundo, experimental dedutivo quanto as fases de simulações.

Descreve-se a seguir os métodos aplicados:

- 1. **EXPERIMENTAL INDUTIVO** refere-se aos levantamentos de campo das variáveis ambientais (iluminância, temperatura do ar, temperatura radiante, umidade do ar e velocidade de ar) e das variáveis construtivas inerentes ao projeto de microapartamentos. Os levantamentos de campos permitiram a coleta de dados que foram utilizados na fase de pré-modelagem.*
- 2. **EXPERIMENTAL DEDUTIVO** abrange a etapa de simulações computacionais que é dividida em três fases: pré-modelagem, modelagem e pós-modelagem.*
 - **Pré-modelagem** corresponde às simulações de parte dos exemplares dos levantamentos de campo com o objetivo de investigar as incertezas inerentes às simulações a partir de análise de arquivos climáticos, validações das simulações térmicas e luminosas e das análises de sensibilidade local.*
 - **Modelagem** contempla o desenvolvimento do modelo a partir da parametrização de dados de entrada e da criação da função objetiva que unifica os dados de saída em apenas um único parâmetro.*
 - **Pós-modelagem** consiste no tratamento estatístico dos dados simulados obtidos a*

partir do modelo parametrizado e a construção da matriz de decisão das soluções de conforto a serem aplicadas em etapa de concepção do projeto.

Os dados obtidos nas medições e nas simulações serão analisados comparativamente, tendo como embasamento teórico os dados secundários levantados na revisão bibliográfica e nas normativas e legislações vigentes.

PRODUTO

Em relação às unidades estudadas, os produtos dessa tese são:

- (I)** *Conjunto de problemáticas quanto ao conforto termo-luminoso do usuário.*
 - (II)** *Avaliação dos casos em estudo.*
 - (III)** *Reflexão crítica do desempenho termo-luminoso dos microapartamentos contemporâneos;*
- Como produtos finais da tese têm-se:*

- (IV)** *Metodologia para avaliação de estratégias de conforto termo-luminoso no início do processo de projeto;*
- (V)** *Matriz de decisão das estratégias de conforto termo-luminoso composta por duas matrizes, de relevância e de interação;*
- (VI)** *Análise de cenários considerando contexto climáticos futuros;*

Por fim, com o intuito de explanar o percurso percorrido para o desenvolvimento do trabalho apresenta-se na figura 1.1 a síntese da estrutura da tese e em seguida um resumo de cada capítulo.

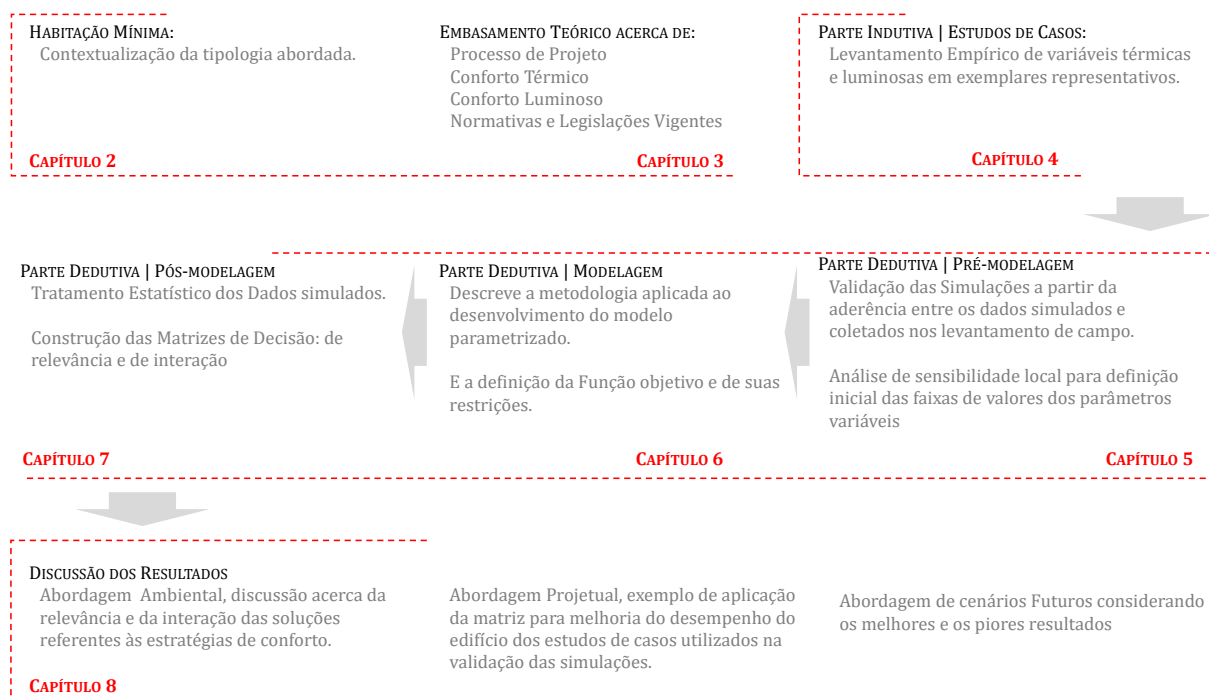


Figura 1.1 | Estrutura da Tese | Fonte: autoral

RESUMO DOS CAPÍTULOS

2. HABITAÇÃO MÍNIMA

Capítulo que discorre acerca das habitações mínimas , abordando sua trajetória histórica e desenvolvimento culminando nas atuais tipologias de moradia compacta. Por meio deste, demonstra-se a relevância e o impacto da tipologia de microapartamentos, objeto da pesquisa, no atual contexto nacional e internacional.

3. EMBASAMENTO TEÓRICO

O Capítulo 3 | Embasamento Teórico discorre acerca da bibliografia fundamental que suportou o desenvolvimento das etapas práticas indutivas dos levantamentos de campos e dedutivas das simulações, modelagem e tratamento de dados. Para tanto, foram levantado o estado da arte em relação às temáticas de arquitetura bioclimática, conforto térmico, luminoso, processo de projeto integrado e tomada de decisão em fases iniciais de projeto , modelagem parametrizada e por último legislações e normativas. Por vezes, dados levantados na revisão bibliográfica são apresentados durante as etapas práticas, contrastando os dados obtidos na pesquisa.

4. LEVANTAMENTOS DE CAMPOS

O Capítulo 4 | Levantamentos de Campos aborda a etapa indutiva da pesquisa acerca das medições das variáveis ambientais de cinco estudos de casos. Nele apresenta-se os dados coletados que serviram para os estudos de aderência das simulações computacionais e uma série de avaliações e análises que embasaram a discussão do conforto termo-luminoso nos microapartamentos contemporâneos com foco na relação espaço-usuário. Os levantamentos foram realizados em quatro unidades sem ocupação, que permite um maior controle das variáveis medidas para aderência das simulações e uma unidade ocupada, que demonstrará o perfil de ocupação dessa tipologia. O capítulo está estruturado em cinco etapas: etapa 1, delineamento da amostra dos estudos de casos; etapa 2, caracterização dos levantamentos de campo; etapa 3, tratamento de dados; etapa 4, análise térmica e luminosa; etapa 5, discussão dos resultados.

5. PRÉ-MODELAGEM

O Capítulo 5 | Pré-modelagem abarca as avaliações e os estudos que embasaram o desenvolvimento consistente do modelo parametrizado, imprimindo confiabilidade e credibilidade aos resultados. O capítulo irá discutir as validações das simulações e as análises de sensibilidade local que conduziram a investigação acerca das incertezas inerentes as simulações. Primeiramente, elenca-se os arquivos climáticos presente e futuro que se

comprovam mais pertinente a pesquisa. Em segundo momento, a validações das simulações térmicas e luminosas separadamente, atestando a aderência destas por meio da correlação e do tratamento estatístico dos dados simulados e dos dados medidos. Por fim, as análises de sensibilidade local com o objetivo de definir as faixas de variação dos parâmetros de entrada que serão incorporados no modelo parametrizado.

6. MODELAGEM

Descreve a metodologia aplicada ao desenvolvimento do modelo parametrizado que composto por simulações integradas de desempenho térmico e luminoso, que suportarão à tomada de decisão no início do processo de projeto (etapa de concepção). Foram apresentados tanto a parte da construção do modelo tridimensional, como o processo de parametrização, com as definições dos parâmetros fixos e variáveis, e a função objetivo que sintetiza em uma única resposta múltiplos dados de saída. Os dados simulados foram obtidos a partir do modelo multiobjetivo parametrizado que permitiu a simulação integrada (térmica e iluminação natural) e automatizada de 73.728 cenários.

7. PÓS-MODELAGEM

O capítulo 7| Pós- modelagem aborda o tratamento dos resultados obtidos na fase de modelagem e está organiza em duas partes: o tratamento estatístico dos dados e a construção das matrizes de decisão. O tratamento estatístico permitiu explorar de forma estruturada o vasto universo composto pelos cenários derivados das combinações entre os parâmetros variáveis. A partir da aplicação de regressões multivariadas e análises de sensibilidade foi possível identificar a relevância e as interações dos parâmetros de entrada e, conseqüentemente, orientar a construção das matrizes de decisão. Por sua vez, a parte de construção das matrizes de decisão focou no desenvolvimento das matrizes de relevância e de interação que de forma gráfica e esquemática explicitam o efeito da combinação das soluções arquitetônicas no desempenho termo-luminoso. O tratamento dos resultados obtidos no modelo parametrizado permitiu a criação de um conjunto de análises e avaliações que podem ser aplicados em etapas iniciais do projeto de microapartamentos e, assim, proporcionar uma tomada de decisão orientada.

8. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A discussão de resultados abarcará análises e avaliações dos resultados obtidos na fase de pós modelagem, com ênfase no desempenho ambiental e na concepção do projeto levando em consideração cenários climáticos atuais e futuros. Assim, será possível a elaboração de reflexões críticas acerca da inserção de estratégias passivas para promoção do conforto do usuário e a sua extrapolação em diferentes contextos climáticos.

A discussão ambiental aborda a avaliação do desempenho integrado e as interações dos

parâmetros de entrada. Além de análises individuais e comparativas do conforto térmico e luminoso por meio de índices de conforto, de métricas de iluminação natural e de variáveis ambientais como temperatura operativa e iluminância.

A abordagem projetual irá debruçar-se sobre os impactos das soluções arquitetônicas para o conforto termo-luminoso e a inserção de informações no início do processo de projeto para construção de tomadas de decisões orientadas. Ao compreender a relação imperativa do projeto na formatação do conforto e a atual complexidade do processo de projeto, busca-se discutir a integração das análises ambientais ao projeto em etapas iniciais, em que a oportunidade de alteração de projeto é maior e mais facilitada.

2. Habitação Mínima Verticalizada

2.1. A VERTICALIZAÇÃO DA HABITAÇÃO COLETIVA | BREVE CONTEXTO

O processo de verticalização está intrinsecamente relacionado ao modelo industrial de cidade. A partir da Primeira Revolução Industrial, no final do século XIX, observou-se um desenvolvimento econômico dos núcleos urbanos, que impulsionaram uma intensa migração do campo para as cidades. Entretanto, o descompasso entre o efervescente desenvolvimento tecnológico e o acelerado crescimento urbano culminou na profunda crise habitacional do início do século XX.

Diante de tal cenário emergencial, com a escassez de espaços nas regiões centrais e a demanda vertiginosa por habitações populares, a questão habitacional toma maior importância, principalmente em governos da Europa e dos Estados Unidos. Contudo, de acordo com Aymonino (1973), a problemática da moradia urbana era abordada, até aquele momento, como mazelas resultantes do adensamento e da precariedade da infraestrutura e não uma questão social. Somente no período entre guerras mundiais que a verticalização e o debate do projeto de modernidade se intensificaram. A crescente oportunidade de aplicações dos avanços da ciência, como o uso do aço estrutural e do concreto armado e a urgência em suprir o déficit habitacional, agravado pela primeira grande guerra na Europa, fomentaram reflexões e comportamentos acerca do projeto habitacional. Nada mais lógico que tal espírito do desenvolvimento tecnológico tenha “contaminado” a arquitetura, em especial a produção de habitações (FOLZ, 2005).

Originou-se, então, um revolucionário e enriquecedor modo de pensar a problemática da moradia urbana, incorporando o desenvolvimento tecnológico à esfera da habitação. De acordo com Vianna (2011), era o nascimento da arquitetura Moderna, tendo como tema principal a habitação coletiva, que resultaria numa verdadeira epistemologia do projeto de habitação. Nesse sentido, o projeto do edifício de apartamentos se configurará como tipologia típica da cidade moderna e contemporânea, cuja densidade é crescente (VIANNA, 2011).

“A verticalização foi definida como a multiplicação efetiva do solo urbano, possibilitada pelo uso do elevador. A essa ideia associam-se a característica da verticalidade, o aproveitamento intensivo da terra urbana (densidade) e o padrão de desenvolvimento tecnológico do século XX, demonstrando-se a relação verticalização/adensamento.”

(SOMEKH, 1997, p20)

No Brasil, a habitação verticalizada coletiva foi gradativamente ocupando espaço no cenário imobiliário nacional, consolidando-se ao longo do século XX (VILLA, 2008). Apesar da verticalização estar associada à escassez territorial, tornando-se alternativa de reprodução do solo urbano por meio da sobreposição de pavimentos, raramente nas cidades

brasileiras, esta se deve à limitação da expansão horizontal ou ao anseio de compactação do perímetro urbano. De fato, o que se presencia é uma expansão vertical desorganizada incentivada pela especulação imobiliária e pelo mercado privado, que comanda as regras de ocupação e uso do solo brasileiro (SOMEKH, 1997).

Nesse sentido, “é inequívoca a magnitude do impacto da verticalização urbana na paisagem das principais metrópoles brasileiras, regendo a gestão pública edilícia e urbana. Determinante também no cotidiano dos cidadãos, sejam consumidores ou não desse mercado, uma vez que conduz a dinâmica e o planejamento das materialidades urbanas” (ANITELLI, 2015).

2.2. HABITAÇÃO | SÃO PAULO E A VERTICALIZAÇÃO

No Brasil, transformações como a abolição da escravatura, proclamação da República, êxodo populacional e industrialização, ocorridos no final do século XIX, impulsionaram a história dos edifícios altos, principalmente nas cidades do Rio de Janeiro e de São Paulo. O primórdio da verticalização em São Paulo é marcado pela construção de edifícios de uso misto com térreo comercial, até três pavimentos e concentrados no centro histórico da cidade. Esse primeiro momento corresponde ao início do dinamismo da metrópole, predominantemente terciário e caracteriza-se pelo vínculo com a construção civil estrangeira, assinalando o advento da modernidade (SOMEKH, 1997).

O surgimento do edifício de apartamentos, nas primeiras décadas do século XX, ocorre a fim de resolver o problema de moradia da classe média. Nas classes populares, entretanto, a carência habitacional era suprida por meio de pensões, pois, a legislação, impossibilitava a construção de espaços mínimos e conseqüentemente a aquisição de imóveis pela população mais carente.

No início, a organização interna dos apartamentos não difere estruturalmente dos palacetes, como ilustrado na figura 2.1. Segundo Somekh (1997), o que ocorre é a transferência do modelo francês burguês de habitação setorizado e compartimentado em áreas íntima, social e de serviço, baseado no pensamento científico-tecnológico europeu da época. A assimilação desse novo modo de vida às alturas está associada a uma nova ordem econômica internacional, sendo difundida pela elite, por meio da ideia de modernidade. Contudo, somente a partir da década de 1940 que tal o modo de morar francês e, posteriormente, norte-americano se estabelecerão. É também o período no qual o processo de verticalização passará de terciário para residencial, transformando profundamente a paisagem urbana paulistana (ANITELLI, 2015).

O aumento significativo da produção dos edifícios residenciais consolida à preferência por uma maneira de morar nas alturas e a influência do mercado imobiliário na legislação.

De acordo com Tramontano et Al. (2012), mudanças na legislação, para viabilizar projetos, irá se tornar uma das marcas de São Paulo: o seu código de obras sempre irá ser alterado em benefício do incorporador. Entretanto, a alteração mais emblemática é a Lei federal do Inquilinato em 1942, que congelou os valores dos aluguéis, tornando a habitação uma mercadoria especial e suspendendo o direito absoluto de propriedade (BONDUKI, 1994).



Figura 2.1 | Edifício Antônio de Pádua Salles, São Paulo, meados de 1920 | Fonte: Villa, 2008

A partir dessa lei, a relação que era, predominantemente, entre proprietário e inquilino passa a ser entre compra e venda, consolidando uma nova modalidade de empreendimento; a incorporação. A valorização da terra urbana e as mudanças na legislação também possibilitaram que questões básicas inerentes à arquitetura Moderna, como a planta livre, a sobreposição de funções e os espaços mínimos, saem do papel. O maior parcelamento do solo proporcionado por alguns conceitos modernistas impulsionou a produção de uma diversidade de edifícios pautados nesse estilo arquitetônico.

É neste momento que se realiza, por exemplo, o edifício Copan figura 2.2, em 1952, projetado por Oscar Niemeyer, um dos primeiros edifícios de São Paulo a comercializar, legalmente, espaços mínimos de moradia conhecidos pelo nome de kitchenettes, figura 2.3 (TRAMONTANO et AL, 2012). Embora seja um período emblemático para a arquitetura modernista paulistana, sendo o Copan um de seus principais expoentes, apenas fundamentos que iriam de encontro aos interesses dos incorporadores eram difundidos, como a compactação das áreas internas e a estética das fachadas.



Figura 2.2 | Edifício Copan, São Paulo, Oscar Niemeyer, 1952. | Fonte: Acervo Copan, 2018

Nas décadas seguintes, o apartamento, por caracterizar-se como solução

economicamente viável aos consumidores e lucrativa aos incorporadores, popularizou-se, abrangendo todas as camadas sociais (TRAMONTANO, 1998). Durante os anos 1970, São Paulo passou por várias metamorfoses que a definiria como a megalópole atual, consagrando à habitação verticalizada como a principal tipologia de moradia ofertada pelo mercado. A influência da incorporação na produção do espaço construído não era apenas quantitativa, mas também qualitativa e relacionadas à criação de um estilo de vida urbano.

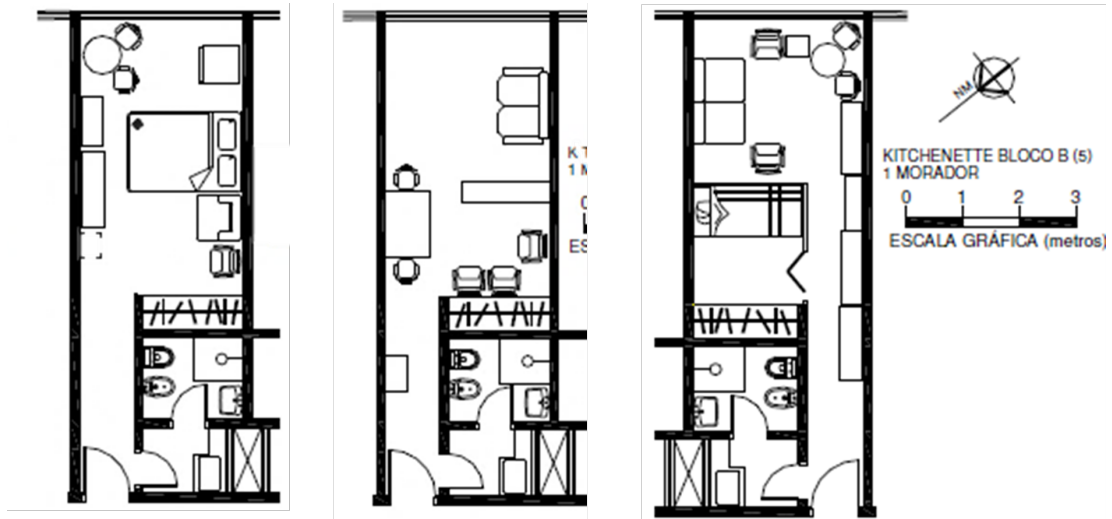


Figura 2.3 | Plantas tipo kitchenette propostas no edifício Copan, 1952| Fonte: Galvão, 2007

Observa-se a redução do tamanho dos cômodos, mas com manutenção do programa dos palacetes e focando no desenvolvimento de imóveis de dois, três e quatro dormitórios. Segundo Villa (2008), em um cenário em que os clientes mais cortejados pertenciam às classes mais ricas da população, poucos foram os empreendimentos de um dormitório ou mesmo *kitchenettes*. A definição de tipologia mínima de apartamento irá se concentrar em unidades de dois e três dormitórios. O mínimo aqui se desassociará do conceito modernista e estará vinculado à funcionalidade de seus cômodos. As áreas destinadas aos funcionários da casa, como dormitórios de empregada, tornam-se reversíveis, podendo ser integradas às áreas sociais ou íntimas, conforme ilustradas nas figuras 2.4 e 2.5. Ocorre também a compactação do programa, descartando-se áreas de transição ou acessórias à dinâmica da vida urbana moderna.

A partir de meados de 1990, muitos dos apartamentos de um ou dois quartos deixam de ser destinados à população de baixa renda, e voltam-se aos solteiros, aos casais sem filhos ou com um único filho, de poder aquisitivo elevado, que preferem uma casa mais prática, mas que permita manutenção da dinâmica de suas vidas sociais. Para compensar estas perdas de área nas unidades, começaram a propagar-se condomínios com equipamentos de uso coletivo como academias, piscinas e churrasqueiras. Apesar da mudança de público, até o início da década de 2000, o quadro geral dos modelos habitacionais ofertados pelo mercado imobiliário na maioria das cidades brasileiras não diferiu muito das tipologias consolidadas ao longo do século XX (ORNSTEIN, 2006).

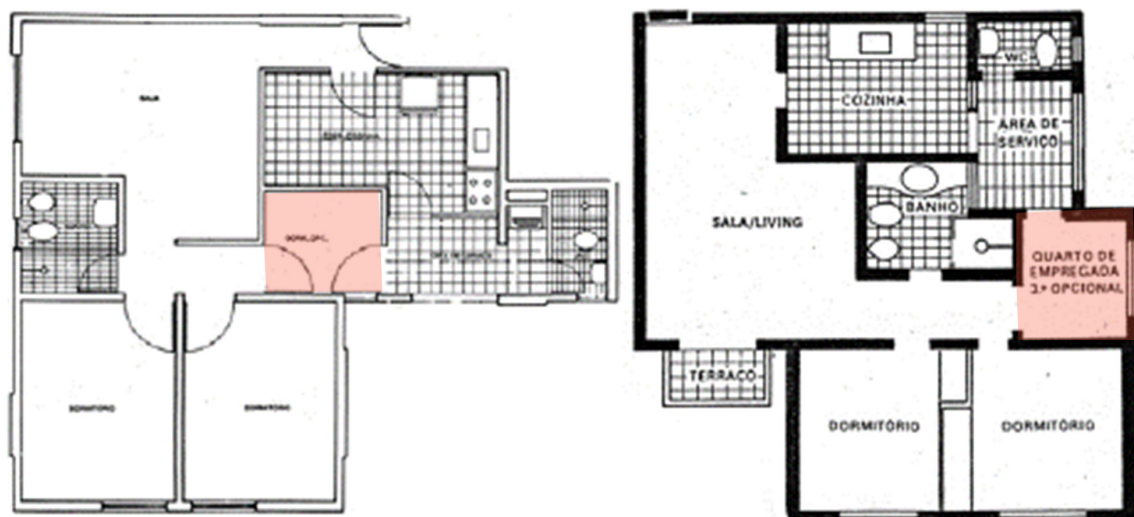


Figura 2.4 | Plantas exemplos de dormitório reversível. | Fonte: Queiroz, 2008

Nas últimas décadas, observou-se a inserção de flats, Lofts, Butler-services e uma valorização das kitchenettes, além das configurações convencionais das habitações mínimas (VILLA, 2008). Tais empreendimentos irão aproximar os edifícios residenciais aos hotéis, incorporando suas comodidades como os espaços de trabalho, as recepções e as lavanderias. Contudo, estas tipologias de habitação continuam a reforçar a estratégia do mercado em vender mais caro, apartamentos menores (VILLA, 2008). A autora reforça que, de maneira geral, os conceptores de apartamentos não respondem as mudanças comportamentais da sociedade, quando oferecem novidades na instância coletiva e tradicionalismo na esfera privada do empreendimento.

Percebe-se, então, que a concepção de apartamentos, principalmente a partir de 1990 na cidade de São Paulo, foi passando de objeto de estudo exclusivamente de arquitetos e urbanistas às mãos de incorporadores, agentes do mercado imobiliário. De acordo com Anitelli (2015), os interesses de investidores influenciam as ações destas incorporadoras que readéquam seus produtos em função destes interesses. Assim, tal dinâmica não define apenas a qualidade dos espaços ofertados, mas também impactará no desenho urbano.

É preciso ressaltar, que a construção civil paulistana exerce forte influência na esfera nacional, sendo a grande catalizadora e difusora das tendências imobiliárias (ANITELLI, 2015). No entanto, segundo o autor, a influência paulistana na construção civil brasileira, atualmente, desempenha-se por meio dos incorporadores atuantes na cidade. Assim, o papel do arquiteto, como o profissional mais adequado tecnicamente à concepção do espaço construído, é ínfimo.

2.3. HABITAÇÃO | HABITAÇÕES MÍNIMAS

As habitações mínimas surgem como soluções de moradia para trabalhadores do início do século XX, fruto do déficit habitacional provocado pelo intenso processo de industrialização e agravado pela primeira guerra mundial. Primordialmente, tratavam-se de propostas especulativas de moradias motivadas pela elevada demanda do mercado por apartamentos menores e mais baratos. Segundo Teige (2002), os apartamentos construídos naquela época apresentavam uma redução de área e cômodos, com critérios de conforto e salubridade apenas para satisfazer os requisitos mínimos dos códigos em vigência.

Apesar das vicissitudes da vida urbana já se fazerem presentes, uma nova concepção de habitação moderna ainda não existia até aquele momento. O debate sobre habitação mínima urbana é colocado em pauta somente entre as décadas de 1920 e 1930. Com maior intensidade nos congressos internacionais de arquitetura moderna (CIAMs), frente a realidade de superpopulação, condições precárias de higiene e edificações inseguras das crescentes cidades do final do século XIX e início do século XX. Antes do movimento modernista não havia se pensado nas implicações que a moradia exercia na qualidade de vida e na produtividade de seus moradores, conceitos que só fizeram sentido após a implementação do capitalismo (TEIGE, 2002).

A reforma e a modernização de pequenos apartamentos populares pela arquitetura moderna tornaram bem claro que o problema da moradia mínima não poderia ser resolvido apenas pela redução e simplificação da planta dos apartamentos tradicionais ou modernizados (TEIGE, 2002). O espaço mínimo de moradia como problemática arquitetônica é precedido de diversas causas como as transformações na estrutural social da população, o desenvolvimento tecnológico e o agravamento da crise habitacional no entre guerras. Por isso, não se tratava de simplesmente reduzir o número e o tamanho dos cômodos, ou simplificar as instalações e outros serviços, mas de um novo programa de habitação alinhado as novas dinâmicas socioeconômicas.

A retórica da habitação mínima e suas múltiplas denominações remonta ao ideário modernista de proporcionar moradia de qualidade, dimensionada ao homem moderno, atendendo suas necessidades vitais, inclusive a de conforto ambiental. A ideia de habitação defendida pelos arquitetos modernistas, como Gropius e Le Corbusier rompe com a estanqueidade da divisão espacial das residências burguesas, tornando a moradia flexível e integrada. De acordo com Teige (2002), na busca de uma nova forma de moradia contemporânea, a vanguarda arquitetônica escolheu a área mínima e a habitabilidade máxima como fórmula técnica ao projeto mínimo de habitação.

Os precursores dessa tipologia entendiam que o mínimo deveria acolher a “vida máxima”, cujo espaço não deveria ser inferior aos padrões necessários à sobrevivência biológica, proporcionando aos seus usuários luz suficiente, acesso ao sol e ao ar e uma

sensação de espaço aberto (TEIGE, 2002). As versões originais de espaço mínimo de moradia se baseavam nos conceitos de funcionalismo, racionalidade e padronização, aproveitando ao máximo as novidades tecnológicas e propondo espaços multifuncionais que permitissem o uso diferenciado entre dia e noite.

Segundo Folz (2005), propõem-se então a flexibilização dos espaços que deveriam ser integrados, separados apenas por painéis deslizantes que seriam posicionados conforme a necessidade de uso dos compartimentos. Nesse sentido, os debates acerca do modo de morar moderno também questionará as atividades domésticas e o conjunto de cômodos destinados à estas. Elaboraram-se, então, duas vertentes de moradia mínima, principalmente no que se refere à formatação interna; a casa unifamiliar isolada e a casa coletiva. A casa coletiva compreende que o mínimo é o local destinado a desfrutar a vida privada intelectual e emocional, focado na acomodação de um único indivíduo adulto (TEIGE, 2002). A autora afirma que neste modelo, ocorrerá a transferência das atividades sociais e de limpeza para a esfera coletiva ou pública, podendo a célula individual ser configurada das seguintes formas:

- i. *Célula individual usada exclusivamente como um cubículo de sono, então as demais funções, inclusive intelectuais, devem ser alocadas em outros espaços.*
- ii. *Célula como habitação privada de um indivíduo, devendo então satisfazer as funções privativas do ser, como descanso, higiene pessoal e trabalho intelectual.*

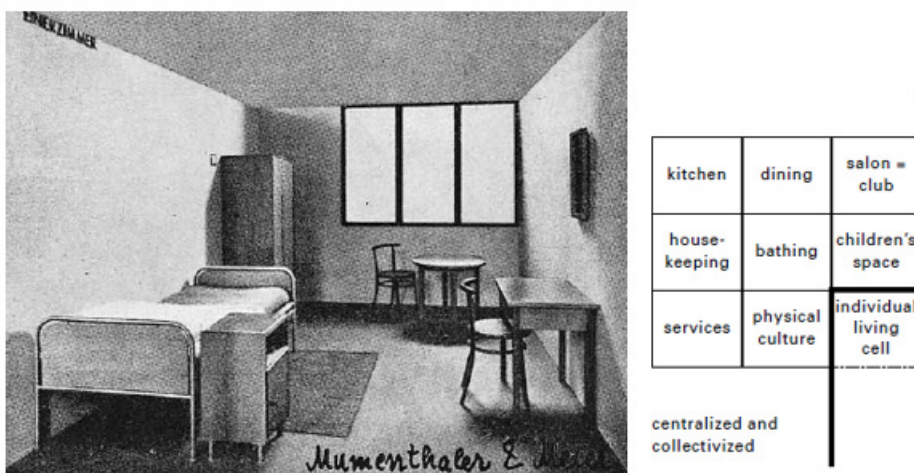


Figura 2.5 | Exemplo de célula individual e matriz de atividades do espaço.
Fonte: Teige, 2002

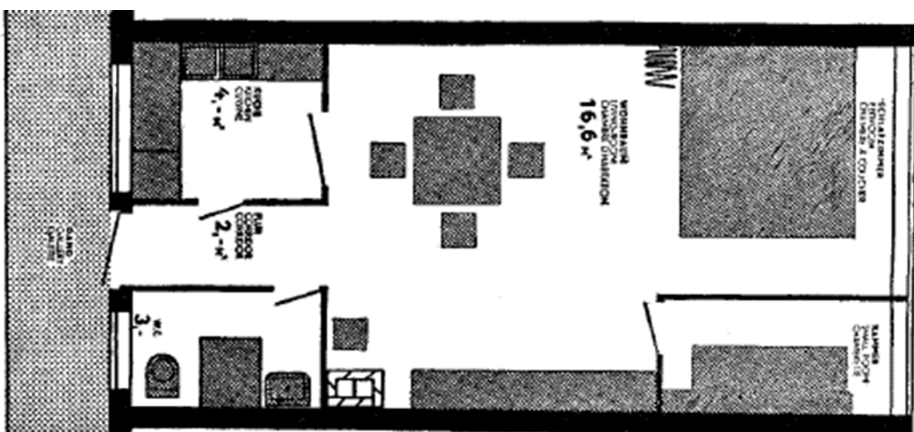


Figura 2.6 | Exemplo de célula como habitação
Fonte: Teige, 2002

Supõem-se aqui que a habitação do trabalhador moderno é unicamente um alojamento e, portanto, a manutenção de áreas como cozinha e lavanderia seja obsoleto. Contudo, a cozinha pode ser relacionada a noção de família como unidade econômica integrada, pois sua subtração está relacionada à uma mudança social e de estilo de vida (TEIGE, 2002). Assim, na reformulação da casa unifamiliar isolada, proposta pelo movimento modernista, buscou-se racionalizar as funções da vida doméstica, mantendo a cozinha como núcleo de tais atividade. O espaço interno será elaborado por meio da integração, mecanização e flexibilidade dos compartimentos, permitindo um uso fácil e adequado às dimensões da habitação.

Outro fundamento que influenciará a formatação do espaço interno, baseado nos conceitos de racionalidade e de funcionalidade defendidos pelos modernistas, é a planta livre. Conforme Aymonino (1973), a habitação é um fenômeno biológico, porém os volumes, os espaços que a comporta estão limitados por uma envoltória que obedece a um regime estático. Portanto, para possibilitar a multifuncionalidade da habitação mínima é essencial que a mesma seja erguida sobre um esqueleto independente, rompendo com a estanqueidade da envoltória.

É nesse contexto que Le Corbusier propõe a Casa Dominó, ilustrada na figura 2.7, de 1915 exemplo da máquina de morar, apresentando o conceito de planta livre por meio de elementos standardizados que permitiam a flexibilidade de variadas configurações internas e externas. Seu interior seria composto por divisórias leves, por portas e armários embutidos que definiriam a modulação da casa. Nos projetos de planta livre, caberá principalmente aos equipamentos e mobiliários a habitabilidade do espaço, além de conferir identidade ao mesmo. Entretanto, este ambiente integrado deverá permitir o exercício concomitante de atividades conflituosas, como dormir e cozinhar, que poderão comprometer o bem-estar e a saúde de seus moradores. Neste sentido, apresenta-se a célula sanitária iluminada e ventilada, mediante tomadas de ar, que concentrará todos os espaços hidráulicos (AYMONINO, 1973).

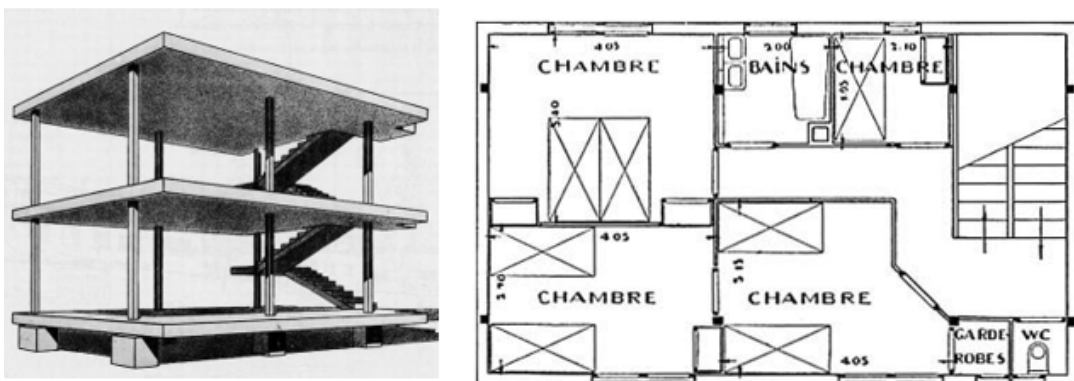


Figura 2.7 | Planta e Perspectiva da casa Dominó, Le Corbusier | Fonte: Caselli, 2008

Para os modernistas, a habitação mínima era um instrumento social indispensável para a nova era e, na retórica positivista, incorporava um apelo à precisão científica para superar costumes tradicionais (ROWE, 1995). O funcionalismo aplicado nas edificações e no seu interior refletia a interpretação científica de mundo e de pessoas que estes vanguardistas preconizavam. O mínimo deveria ser criado a partir de um homem tipo para que se viabilizasse a estandardização da construção, não apenas a parte material, mas a distribuição dos espaços de forma que atendesse toda a sociedade (CASELLI, 2008). O modernismo não contribuiu apenas para um novo estilo arquitetônico, mas transformou o conceito de morar.

“A preocupação era encontrar um mínimo que seja satisfatório tanto do ponto de vista sanitário quanto biológico, ou seja, um mínimo que seja adequado e essencial. A mesma autora afirma que uma célula de habitação para uma pessoa que mede de 8,2 a 9 m², na verdade, oferece um padrão de acomodação mais elevado do que o fornecido por um pequeno apartamento convencional de 20 a 45 m² ocupado por três a seis pessoas.”

(TEIGE, 2002; p350)

A priori, as regulamentações definiam os padrões dimensionais mínimos baseados em critérios de saúde e segurança, a partir das CIAMs, a área mínima por pessoa passou a variar entre 12,5 e 14m². Le Corbusier apresentou a “unidade biológica” ou “célula”, com 14m², mas que servirá de base para outras propostas. De acordo com Teige (2002), se a célula for projetada como um espaço para a vida geral e não apenas como um lugar para dormir suas dimensões podem variar entre 7 a 9 m² e, eventualmente, até 15 m². Há também a célula como alojamento que se aproximará das cabines dos trens e navios e apresentará área em torno de 3 e 4m².

As discussões acerca da habitação mínima atingem grande repercussão no pós Segunda Guerra Mundial, principalmente na Europa, devido à significativa mudança social e econômica vivenciada na época. Mudanças na estrutura familiar e nas funções sociais das moradias, também contribuíram à propagação desse modelo de habitação. A entrada da mulher no mercado de trabalho, implicou profundas mudanças nos núcleos familiares. A família tornou-se atomizada em indivíduos independentes, o que precede que qualquer solução racional para habitação mínima deva postular que cada indivíduo adulto possa ter seu próprio espaço (TEIGE, 2002). Aliado a isso, a industrialização encurtou o tempo que as pessoas despendiam em suas casas e junto com a evolução tecnológica, permitiu a aquisição de eletrodomésticos que facilitassem as tarefas domésticas e compactassem as áreas de serviços.

Esse período foi marcado pela elevada produção das habitações mínimas, incorporadas

nos conjuntos habitacionais, que acabaram estigmatizando-as como habitações de famílias de baixo poder aquisitivo. Entretanto, os precursores desse tipo de arquitetura as entendiam como um novo modo de morar e não apenas uma alternativa de baixo custo à habitação popular. Contudo, as peculiaridades desse modelo habitacional, nos seus primórdios, só eram factíveis onde as grandes demandas se conjugavam com o Estado, como empreendedor e agente financeiro.

Um segundo momento da habitação mínima, a partir de 1960, pela revolução da comunicação e pela tentativa de romper com a rigidez modernista (CASELLI, 2008). Nos primeiros moldes do espaço reduzidos havia a negação a adaptabilidade às necessidades individuais e culturais. Tal ideia era renegada por vincular-se, na época, aos ideais nacionalistas dos governos totalitaristas. A diversidade sociocultural era negligenciada, um dos fatores que mais influencia o ambiente residencial, com as variáveis sociais, ambientais, culturais e comportamentais intrínsecas a sua narrativa. A concepção de uma habitação mínima envolveria resoluções de amplas necessidades biológicas e psicológicas no sistema estático da construção em si (FOLZ, 2005).

A rigidez do modernismo fez com que surgissem diversos movimentos, como o Archigram, na Europa e o Metabolismo, no Japão. Tais movimentos enfatizam a influência da tecnologia na configuração do espaço, que alteram a relação de uso do espaço com o habitante. Também fomentam a ideologia das habitações cápsulas, semelhantes aos produtos industriais, no qual as células habitacionais, flexíveis e de fácil adaptação, são encaixadas no edifício (CASELLI, 2008). As habitações cápsulas no Archigram compõem o plano do “Plug-In City” de Peter Cook, que propõem uma cidade fantástica, em que uma megaestrutura em evolução constante incorpora residências, transporte e outros serviços essenciais. Os modelos propostos pelo Archigram de habitação eram sempre pensados para um indivíduo ou um casal sem filhos e não tinham pretensões de abordar questões sociais (CASELLI, 2008).

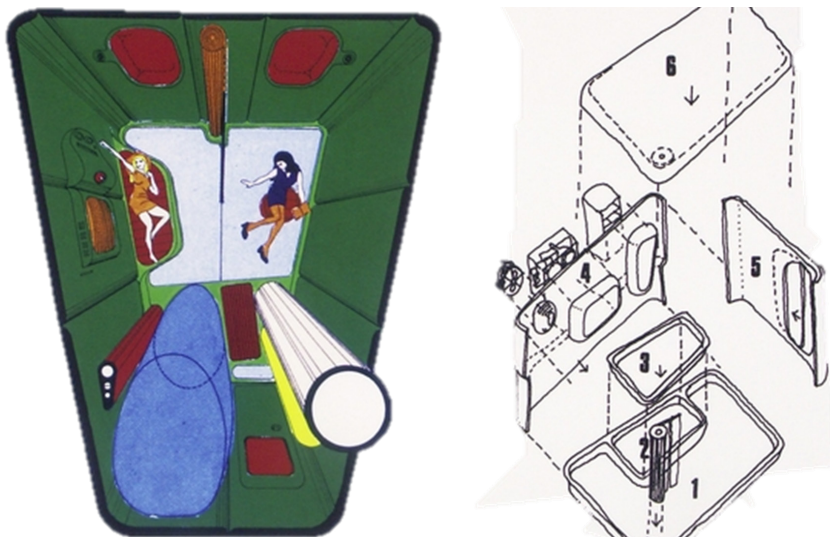


Figura 2.8 | Perspectivas capsule homes project, Warren Chalk. | Fonte: westminster.ac.uk

No Japão, as questões referentes à habitação mínima entrarão em pauta a partir da década de 1950, com a superpopulação das cidades. Análogo à Europa, após a segunda guerra mundial, o Japão passa por um processo de reestruturação em que aflora o movimento metabolismo. Seus precursores buscam a criação de uma identidade nacional, conciliando valores tradicionais com modernidade. Ainda, propunham a ideia de cidades fluxos, ao pensar em um projeto urbanístico que fosse flexível e transformável, incorporando os avanços tecnológicos.

Como o Archigran, segundo Caselli (2008) o metabolismo também foi uma grande utopia da academia, na década de 1960, propondo superestruturas que permitiam o “encaixe” de células habitacionais de tamanhos diferentes. Tal modelo possibilitava crescer ou encolher conforme a demanda, aproximando-se da filosofia de produção seriada da indústria. Pouco se produziu, sendo a Torre Nagakin projetada por Kurokawa, de 1971 em Tóquio, seu maior exemplar. Com dois núcleos centrais de concreto compostos por 140 cápsulas, sendo cada cápsula de 2,5 × 4 × 2,5m. A iluminação e ventilação é feita por uma janela circular central.

Nas últimas duas décadas, as habitações mínimas deixam de ser tratadas como espaços residuais e passam a estar no foco do mercado imobiliário, principalmente nas grandes metrópoles (RACK, 2016). Questões atreladas ao meio ambiente, a fertilidade, ao envelhecimento da população e a complexidade das relações domésticas tem demonstrado o descompasso entre o estoque de moradias e as necessidades residenciais (COHEN, 2021). Cohen (2021) faz um levantamento de cinco casos emblemáticos de habitação contemporânea “eficiente em termos de espaço” ao redor do mundo. Os casos são o movimento das Tiny-houses nos Estados Unidos, os Small(er) Houses and Apartments em Helsinki na Finlândia, Accessory Dwelling Units em Portland nos Estados Unidos, os Microapartamentos em Nova Iorque e São Francisco e os Co-living em Hamburg e Londres. Segundo o autor, todos são respostas tangíveis às mudanças nas circunstâncias econômicas, evolução da dinâmica demográfica, estética inovadora e realidades do estilo de vida cotidiano.

Cohen (2021) traz também a reflexão sobre a capacidade desses experimentos de promover uma verdadeira transição de consumo sustentável. No entanto, pode-se postular que essas mudanças são indicações discerníveis de que os modos de habitação atualmente superdimensionados, com suas vastas extensões de espaço subutilizado, não estão atendendo às necessidades de um número crescente de famílias (COHEN, 2021). Não obstante, a falta de espaço nos centros urbanos fomentou o problema de moradia inacessível e para manter o preço da habitação acessível, os apartamentos compactos tornaram-se uma alternativa de habitação em bairros centrais para a crescente população que busca domicílios unipessoais. Observa-se uma tendência desse público de trocar o espaço do apartamento por uma vida urbana acessível, em que o bairro se torna uma extensão de sua sala (RACK, 2016). Segundo o autor, tal tipologia de moradia também são atraentes

aos investidores devido ao potencial de gerar aluguéis mais altos por metro quadrado do que as unidades convencionais.



Figura 2.9 | Tiny House moviment - exemplo | **Fonte:** hespruce.com/tiny-homes

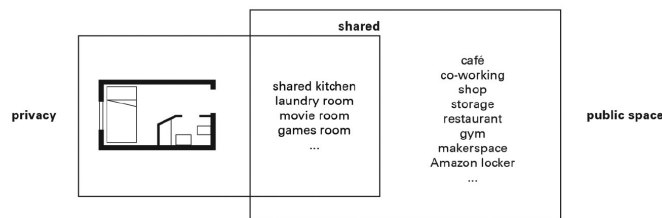


Figura 2.10 | Co-living Londres- diagrama conceitual acima e o edifício de co-living The Collective Old Oak, | **Fonte:** <https://doi.org/10.17645/up.v7i1.4805>

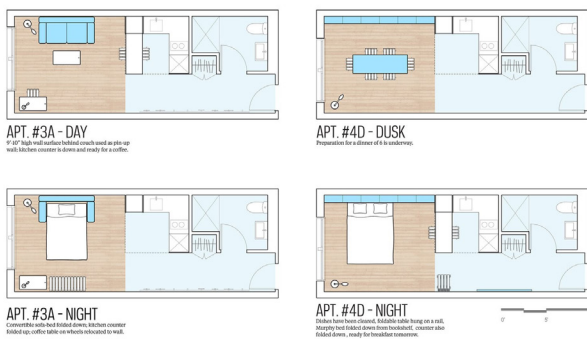


Figura 2.11 | Microapartment plantas e imagem em Nova Iorque | **Fonte:** www.archdaily.com.br/br/763437



Figura 2.12 | Compacto ADU em Portland | **Fonte:** <https://www.propelstudio.com/project/sustainable-portland-adu>

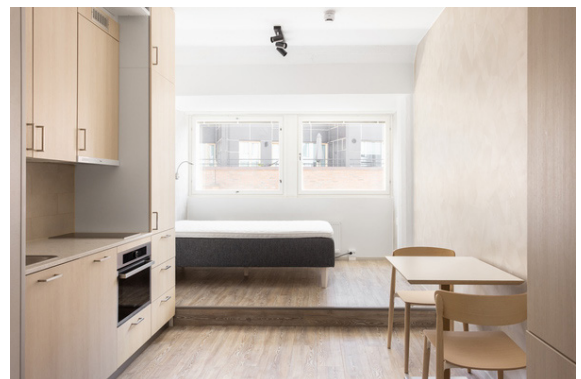


Figura 2.13 | Small flat em Helsinki | **Fonte:** www.vuokraovi.com/vuokra-asunnot/helsinki

Atualmente as habitações compactas são difundidas como microapartamentos, mas não há uma definição universal. Na literatura acadêmica, não parece haver consenso sobre a terminologia: alguns estudiosos e planejadores falam em “microunidades”, outros usam a frase “microapartamentos” e os desenvolvedores dessas unidades muitas vezes evitam qualquer menção de tamanho ao comercializar estes apartamentos (GEFFNER, 2018). Há também uma variação em relação ao seu tamanho que varia entre cidades e países. Soub et al (2021) relatou as variações de área dos microapartamentos em diversas cidades. Nos Estados Unidos, o tamanho dos microapartamentos varia numa faixa de mínimo entre 20m², em São Francisco até 42m² em Boston. Em Estocolmo, com tamanho médio de 25m², Sydney, 28m² e Hong Kong, inferior a 40m². No Brasil, não há tal classificação, porém a SECOVI em seu anuário sobre o mercado imobiliário considera 40m² o menor valor de área útil de apartamento residencial (somada área de varanda e interna).

O Urban Land Institute (2014) explica que um microapartamento embora não tenha uma definição padrão, trata-se de um pequeno estúdio, normalmente com menos de 350 pés quadrados (32m²), com cozinha e banheiro totalmente funcionais e compatíveis com acessibilidade. Para Geffner, os microapartamentos não precisam necessariamente ter cozinhas completas, alguns dos primeiros projetos de microapartamentos nos Estados Unidos, tinham apenas cozinhas parciais na unidade e usufruíam de espaço de cozinha comum, como o edifício Footprint Hollywood, em Portland. Ainda, observa-se o crescimento de microunidades que podem ser facilmente reconfiguradas em apartamentos maiores no futuro (Urban Land Institute, 2014).

Os microapartamentos contemporâneos minimizam o espaço por meio de plantas otimizadas para torná-los os mais eficientes possíveis para seu tamanho, proporcionando uma vida acessível em áreas urbanas (Gabbe, 2015). Esta tipologia de moradia é caracterizada por espaços multifuncionais e com mobiliário flexíveis ou reversíveis, diferentemente das habitações mínimas do passado (SOUB et al, 2020). O mesmo mobiliário pode exercer diferentes funções, como sofá e cama, mesa e cadeira, ajudando os residentes a viverem em pequenos espaços. Além disso, os espaços podem ser mais compactos devido à evolução tecnológica, que tem reduzido o tamanho e a quantidade de equipamentos. Ademais, os microapartamentos contribuem significativamente ao adensamento urbano, ao aumento da diversidade de residências e da eficiência energética, aliada à redução de emissão de carbono por atenuar a dependência de veículos e estimular o caminhar (GEFFNER,2018).

Assim, a discussão do mínimo na era contemporânea é caracterizada por mudanças climáticas, desigualdade econômica e profundas divisões sociais, acrescido de questionamentos provenientes da pandemia de COVID em relação à saúde e ao bem-estar dos moradores dessas habitações compactas. Não obstante, o acordo de Paris e a Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável exigem que os países de alta renda busquem uma transição de consumo sustentável e a redução do tamanho da casa,

devido aos volumes substanciais de recursos necessários para atender o funcionamento das residências, é parte crucial dessa meta (COEHEN, 2021).

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim, uma das questões essenciais da moradia é o caráter transitório e mutável do interior da casa, apesar da longevidade da construção. O que hoje é absolutamente necessário, no futuro pode ser totalmente descartável. A habitação sofre com a evolução tecnológica, padrões de uso, hábitos e estruturas socioeconômicas, que a torna defasada num período relativamente curto. A maioria das necessidades primárias acontece dentro da residência, porém variável conforme a faixa etária do usuário. O ser humano costuma ter rituais cotidianos que são distintos nas diferentes fases da vida, portanto o uso do espaço é modificado em quantidade e qualidade ao decorrer dos anos (CASELLI, 2008).

Há uma alarmante defasagem entre as modificações da sociedade e a capacidade da habitação de acompanhá-las, o que acaba por reproduzir modelos ultrapassados de moradia. Quando se começou a projetar habitações com espaços reduzidos, pensava-se em famílias básicas de 4 ou 5 pessoas, hoje em dia o mínimo é pensado para um único indivíduo (TRAMONTANO, 1998). Portanto o mínimo é relativo, e fruto da diversidade cultural, social, econômica, das exigências biológicas, psicológicas, dentre outros.

As questões de mínimo na reflexão sobre moradia não são referentes apenas ao dimensionamento, mas também ao conforto ambiental, inerente a promoção da qualidade de vida e bem-estar do usuário. Estes mínimos biológicos são essenciais para determinação do real espaço necessário a execução das atividades vitais cotidianas, como higiene, alimentar e repousar (CASELLI, 2008). Atualmente, outras questões são inseridas e norteiam a dialética das habitações mínimas, como a escassez e custo da terra, a sua inserção na malha urbana e problemáticas ambientais e sociais, que tem desassociado a imagem dos espaços reduzidos à moradia popular.

É frequente a propagação dessas habitações em regiões valorizadas e altamente adensadas de cidades como Nova Iorque, Tóquio e Paris, caracterizando-se por alternativa de parcelamento do solo destinadas as classes de maior poder aquisitivo. Apesar das atuais reflexões quanto ao modo de viver que se fazem presente na academia e no cotidiano das pessoas, a construção civil ainda está muito moldada pela especulação imobiliária, principalmente em países subdesenvolvidos. O mercado imobiliário continua a traduzir as estatísticas habitacionais como oportunidades de investimento e lucratividade. Fenômenos sociais, como os déficits habitacionais, não podem ser interpretados apenas quantitativamente. Na verdade, as estatísticas captam principalmente os fatos que já são consequências, e, portanto, são suscetíveis de nos enganar seriamente ao não revelar suas causas essenciais e seus motivos (TEIGE, 2002).

3. Embasamento Teórico

Segundo Olygay (1962), dado que o ser humano constitui a medida de referência fundamental da arquitetura, seu refúgio se projeta para satisfazer suas necessidades. Além do referencial humano, os impactos ambientais derivados da construção e da operação de um edifício também constituem condicionantes importantes para a avaliação do conforto do usuário, em especial do conforto térmico. Assim, como as pessoas despendem entre 85% e 95% do seu tempo em espaços fechados, a qualidade do ambiente interno se torna imperativa à saúde, ao conforto do usuário e ao desempenho do edifício (SANTAMOURIS, 2009).

A qualidade ambiental do espaço construído é composta por uma complexidade de variáveis físicas, fisiológicas, psicológicas, comportamentais e climáticas que interagem entre si e definem o nível de conforto do usuário. As questões relacionadas à qualidade do ambiente interno começaram a receber atenção especial na crise energética da década de 1970 e retomaram seu protagonismo nos anos 2000s frente às mudanças climáticas. O acelerado processo de urbanização e verticalização impulsionaram o consumo energético dos edifícios tornando-os responsáveis por cerca de 40% do total da energia consumida mundialmente (WARGOCKI, 2009). No Brasil, o setor residencial apresenta um crescente aumento no consumo de energia, passando de 21% em 2015 para 30% em 2021, do total de energia elétrica consumida no país (Empresa de Pesquisa Energética, 2022).

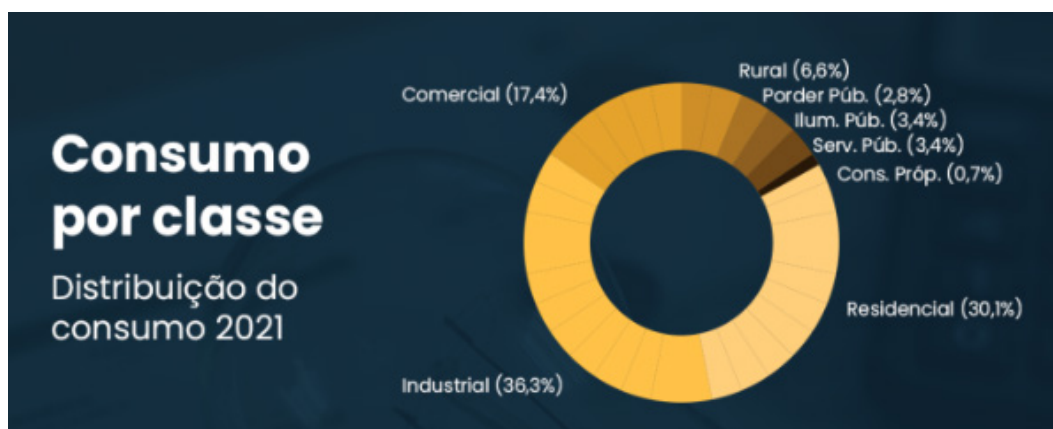


Figura 3.1 | Consumo de energia elétrica no Brasil em 2021 por classe | Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022)

O condicionamento mecânico e à iluminação artificial representam parcela significativa desse consumo sendo imprescindível a melhoria do desempenho energético dos edifícios para aliviar a pressão sobre os recursos naturais. Ainda, diversas pesquisas voltadas à qualidade do ambiente interno (CHINAZZO, 2022; BELLIA 2021; DUSSAULT et GOSSELIN, 2017) demonstraram a elevada interação e interdependência da térmica com a iluminação para o conforto térmico e luminoso e à eficiência energética. Não obstante, a eficiência energética na arquitetura pode ser entendida como um atributo inerente à edificação representando o potencial de otimização do consumo de energia sem prejuízos ao conforto ambiental.

Por fim, além do crescimento urbano e populacional, as mudanças climáticas também

evidenciaram a necessidade do ambiente construído de ofertar oportunidades de adaptação e mitigação aos seus usuários, com o intuito primário de atenuar os prejuízos à saúde e ao bem-estar humano decorrentes do aquecimento global.

3.1. ARQUITETURA ADAPTADA AO CLIMA

A arquitetura adaptada ao clima é baseada na maneira em que a concepção e a construção de um edifício moderam o clima para o bem-estar do ser humano (HYDE,2013). A arquitetura responde ao clima como um veículo adicional para ampliar a experiência dos indivíduos com o meio construído. Ao abordar a importância das considerações climáticas na concepção de edifícios mitiga-se os impactos ambientais e permite-se a incorporação de estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

Acrescenta-se à situação as mudanças climáticas decorrentes das ações antropogênicas, que encontram no ambiente construído um dos seus principais agentes. Os acelerados processos de urbanização, verticalização e a adensamento impactam na qualidade ambiental do edifício. Assim, é inerente que as cidades, como meio de interação dos espaços internos e externos, compreendam e gerenciem o clima local para obterem respostas mais avançadas em relação às mudanças climáticas globais (HEBBERT e JANKOVIC, 2013).

Contudo, para que soluções mais eficientes, em relação ao clima, sejam elaboradas, é necessário superar também barreiras culturais e institucionais. A maioria dos países tropicais importaram padrões de conforto ambiental de regiões temperadas. Geralmente, estudiosos e profissionais assumem que as estratégias desenvolvidas para regiões temperadas podem ser reproduzidas nos trópicos, muitas vezes ignorando as características climáticas locais e descartando as possibilidades de conforto adaptativo.

Deve-se compreender que a implementação generalizada das tipologias pode causar grave problemas quando se adaptam como símbolos incorretos do progresso cultural, visto que estas formas têm sua origem na resposta a climas frios (OLYGAY, 1962). É comum relacionar padrões de conforto térmico e vestimentas de regiões de clima frio com progresso econômico e status sociais, há pesquisas que correlacionam o crescimento do PIB com o uso de ar condicionado. Assim, o fomento da arquitetura passiva e do conforto adaptativo depende primordialmente de alterações das práticas construtivas e preferências culturais locais, do rompimento de paradigmas socioeconômicos.

“Minha preocupação é relativa a ênfase ao quantitativo como principal objeto de projeto ambiental, em torno precisamente do conflito do mensurável e do não mensurável...a quantificação e a mecanização podem coexistir com uma interpretação poética da natureza no ambiente arquitetônico.”

(HAWKES, 2008, p.xiii)

Para Emmanuel (2005), o projeto adaptado ao clima é a chave para facilitar a adaptação às mudanças climáticas, especialmente no meio urbano. Isto é particularmente urgente em cidades tropicais onde a carga de refrigeração é um grande entrave ambiental. Somente um projeto cuidadoso dos espaços para torná-los confortáveis e alcançar uma razoável forma de habitação nas regiões densamente povoadas dos trópicos. (EMMANUEL, 2005).

3.2. CONFORTO TÉRMICO

"Thermal comfort can be defined as 'that condition of mind which expresses satisfaction with the thermal environmental'"

(ASHRAE, 1966).

A arquitetura deve servir ao homem e ao seu conforto, o que abrange o seu conforto térmico (FROTA, 2003), porém, a sensação de conforto é variável de acordo com o tempo, indivíduo e clima, não se caracterizando como resposta única ou padrão. Na pesquisa de revisão bibliográfica conduzida por Frontczak e Wargocki (2011), sete dos nove estudos levantados pelos autores indicaram que os usuários classificam o conforto térmico como o parâmetro mais importante para melhorar a satisfação com o ambiente interno. Os autores ressaltaram também que o conforto térmico é influenciado pelo tipo de edifício (residencial, comercial, ventilado naturalmente, condicionado) e pelas mudanças climáticas sazonais e, portanto, os controles das condições ambientais internas requerem uma abordagem caso a caso, sendo difícil a adoção de soluções universais que respondam satisfatoriamente a todos.

O entendimento do conforto térmico não está reduzido ao alcance do balanço térmico, mas a um processo dinâmico e mutável que visa o bem-estar e a saúde dos indivíduos aliado a melhorias no desempenho energético, principalmente em espaços naturalmente ventilados. Entendem-se que o conforto se dá em função das sensações humanas e, portanto, o desempenho ambiental do edifício será determinado pela eficiência deste em alcançar o conforto desejado por seus ocupantes.

As avaliações nessa área são comumente balizadas por índices de conforto térmico que procuram englobar, em um único parâmetro, os efeitos em conjunto das variáveis que condicionam o conforto. De acordo com Assis (2010), os índices objetivam integrar as variáveis do microclima às respostas de adaptação humana, em condições de repouso ou no exercício de atividades variadas, de maneira a identificar condições psicrométricas de conforto e ou desconforto higrotérmico para uma população aclimatada.

Os primeiros estudos de índices de conforto térmico remontam de 1916 estimulados pela Revolução Industrial, com objetivo de melhorar o rendimento dos operários. Quatro trabalhos de pesquisas são as principais referências de índices: Temperatura Efetiva (Houghten e Yaglou, 1923); Temperatura Operativa (Winslow, Herrington e Gagge, 1937);

PMV – Predicted Mean Vote – (Fanger, 1972); modelo adaptativo (Humphreys, 1976). Atualmente, duas prescrições distintas de como administrar as condições climáticas em relação à térmica das edificações se fazem predominantes na área. De acordo com Lamberts, 2014, a primeira, mais conhecida como estática, representa uma linha analítica ou racional da avaliação das sensações térmicas humanas e considera o ser humano como um simples receptor passivo do ambiente térmico, sendo o índice PMV seu maior representante. A segunda, denominada como adaptativa, considera o homem como um agente ativo respondendo às expectativas de variabilidade do ambiente a partir da sua interação com o ambiente (NICOL, HUMPHREYS e ROAF; 2012).

O PMV é um índice de particular importância devido a sua forma básica ser amplamente utilizada em normas nacionais e internacionais, principalmente para ambientes condicionados artificialmente (NICOL, HUMPHREYS e ROAF; 2012). Esse modelo indicou que a sensação térmica das pessoas pode ser estimada medindo a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar, temperatura radiante média (MRT), vestimentas e taxa metabólica (HENSEN, 2016). O PMV de Fanger (1972) considera a resposta média de um grande grupo de pessoas de acordo com a escala de sensação térmica da norma ASHRAE 55 - 2013, sendo:

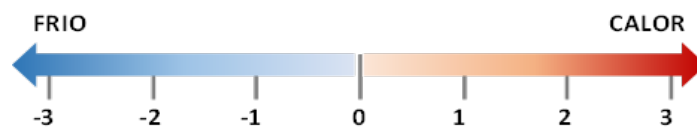


Figura 3.2 | Escala de sensação térmica | Fonte: autoral com base na ASHRAE 55 - 2013

O pressuposto desse índice é que a sensação expressa por esta escala é resultado do estresse fisiológico causado pelo ambiente (MONTEIRO, 2015). O voto preditivo é o valor médio esperado por um grupo de pessoas, e o PMV foi ampliado para prever a proporção de insatisfeitos com o ambiente. Após o cálculo do PMV é possível estimar a percentagem de insatisfeitos (PPD - Predicted percentage dissatisfied), conforme ilustrado na figura 3.3.

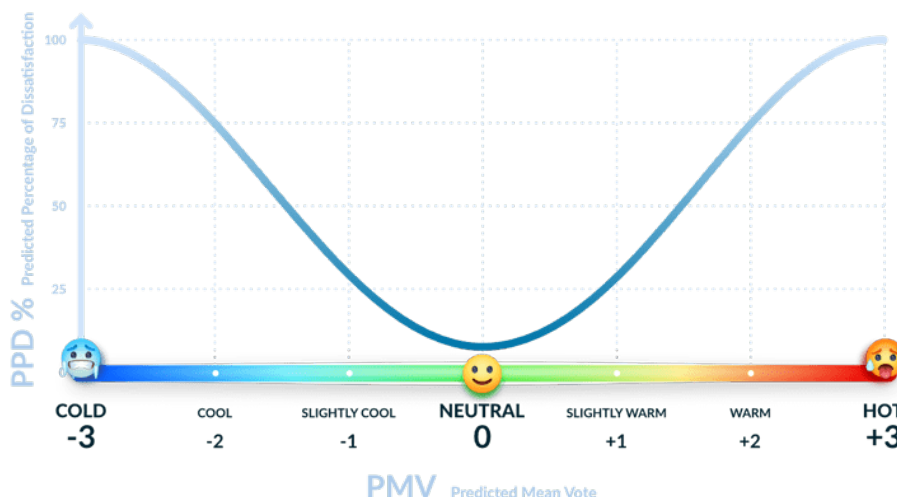


Figura 3.3 | Gráfico do PMV x PPD | Fonte: Simscales, 2020

O conceito do voto médio previsto (PMV) (FANGER, 1972), adotado pela ASHRAE 55, traz condições estreitas e rigorosas para o conforto térmico nos edifícios, sendo amplamente utilizado para a concepção de edifícios condicionados, cujas condições térmicas tendem a ser constantes durante todo o período de ocupação, com pequenas variações ao longo das estações (MONTEIRO, 2015). O modelo PMV superestima ou subestima a sensação real dos ocupantes no ambiente desviando de condições moderadas, especialmente em edifícios naturalmente ventilados. Ainda, o PMV não é capaz de estimar a real sensação de conforto térmico de indivíduos aclimatados a climas tropicais, condição predominante no território brasileiro, prevendo sensação de desconforto térmico mais severa do que os usuários realmente percebem (ASSIS, 2010).

Esses modelos de estado estacionário não são adequados para avaliação de espaços residenciais por se tratar de construções naturalmente ventiladas cuja interação entre o usuário e o espaço é ativa e dinâmica. Ademais, verificou-se que em construções naturalmente ventiladas a variação da temperatura confortável para as pessoas é diferente das condições térmicas estreitas previstas por Fanger (MONTEIRO, 2015). Assim, a avaliação do conforto baseada em modelos estáticos pode induzir a estratégias ambientais equivocadas e fomentar a dependência em sistemas mecânicos de climatização.

Quanto a abordagem adaptativa, esta se baseia no princípio adaptativo de que ao ocorrer mudanças que produzam desconforto, as pessoas reagem de maneira a restaurar o conforto (NICOL, HUMPHREYS e ROAF; 2012). Os estudos nessa área entendem que o conforto térmico não é determinado apenas por respostas fisiológicas, mas pressupõe que o usuário, como elemento ativo, por meio de mudanças comportamentais configurará o ambiente para alcançar seu conforto. De acordo com Monteiro (2015), o conforto térmico não requer apenas compreender o que o corpo humano pode suportar, mas também, até que ponto as pessoas estão dispostas a fazer mudanças comportamentais na forma de experienciar o conforto em seu ambiente. Estas mudanças podem ocorrer no indivíduo, com ajustes das vestimentas, posturas, atividades, ou no espaço, com o controle das persianas, janelas e até mesmo do sistema mecânico.

Entretanto, nas últimas décadas, a capacidade de adaptação térmica do ser humano tem sido mitigada, principalmente com a proliferação dos edifícios selados pautados no condicionamento mecânico. Tais edifícios, fomentados pelo baixo custo da energia durante o século XX, são desconectados do clima e do entorno por se apresentarem em ‘envelopes’ selados (NICOL, HUMPHREYS e ROAF; 2012). O modelo adaptativo está intrinsecamente relacionado ao desenvolvimento das construções verdes, ao possibilitar a implementação mais de estratégias de ventilação natural ou de sistema misto de condicionamento que contribuem para a redução do consumo energético no controle ambiental. Para Nicol *et al* (2012), a abordagem adaptativa auxilia nesse sentido ao trabalhar com diversos atributos que definem um sistema de climatização dinâmico e interativo, mutável, customizável,

com possibilidades de ajustes sazonais e a sua meta não ser um produto. Assim, o conforto deixa de ser visto como um produto seriado comercializável, e passa a ser tratado como um processo, ponderado desde a etapa de concepção do projeto.

O modelo adaptativo é baseado em pesquisas de campo conduzidas em edifícios naturalmente ventilados por Nicol e Humphreys (2012), Auliciems (1981), de Dear, Brager and Cooper (1997) e de Dear e Brager (1998). A partir desses estudos de campo, foram estabelecidas regressões lineares relacionando as temperaturas operacionais internas (faixas aceitáveis) com as temperaturas do ar externas predominantes (prevailing outdoor air temperatures), ou seja, as temperaturas de conforto variam de acordo com o clima externo, temperaturas externas mais altas permitem temperaturas internas mais altas (LAMBERTS *et al*, 2015). O modelo adaptativo considera a interrelação de três aspectos: psicológico (a expectativa e habituação do conforto em relação ao clima interno e externo), comportamental (comportamento do usuário em alterar o espaço para promover o conforto) e fisiológico (aclimatização) (de DEAR *et al*, 1998).

Ao trabalharem com ambientes mais heterogêneo, semelhantes aos existentes, os modelos adaptativos impulsionaram o conhecimento do conforto térmico em condições transitórias, contribuindo significativamente ao desenvolvimento de estudos na área e rompendo com o paradigma do edifício selado como alternativa única de excelência térmica. O modelo adaptativo foi incluído primeiramente na normativa ASHRAE – 55 em 2004, como um método opcional para avaliação de edifícios naturalmente ventilados. Em 2007 também foi incorporado na normativa inglesa EN 15251, sendo estas duas as principais normativas acerca do conforto adaptativo utilizadas no mundo.

3.2.1. MODELO ADAPTATIVO - ASHRAE 55 (2013)

Modelo adaptativo é um índice de conforto que considera ambientes naturalmente ventilados, nos quais as condições térmicas dos espaços são reguladas principalmente pelos ocupantes (ASHRAE 55, 2013). Assim, este modelo apresentará faixas de aceitabilidade do usuário correlacionando as temperaturas operativas mensuradas e a média mensal da temperatura do ar externo, caracterizada pelas temperaturas de ar externas predominantes. Para delimitação das faixas utiliza-se a temperatura neutra, mas relacionada às temperaturas operativas e as porcentagens de tolerâncias aceitas. Assim, a temperatura neutra aqui é denominada de temperatura de aceitabilidade e descrita pela seguinte expressão:

$$T_{(acet.)} = 0,31T_o + 17,8 \pm T_{lim}$$

sendo:

$T_{acet.}$ = Temperatura de aceitabilidade, em °C; T_o = Temperatura operativa, em °C;

T_{lim} = Temperatura limítrofe da faixa de aceitabilidade, em °C;

A temperatura limite é relativa a zona de conforto e, usualmente, padronizada em 90% e 80% de aceitabilidade. Assim, para 90% o Tlim será equivalente à $\pm 2,5\text{ }^\circ\text{C}$ e para 80% igual à $\pm 3,5\text{ }^\circ\text{C}$. Estas correlações podem ser observadas na figura 3.4.

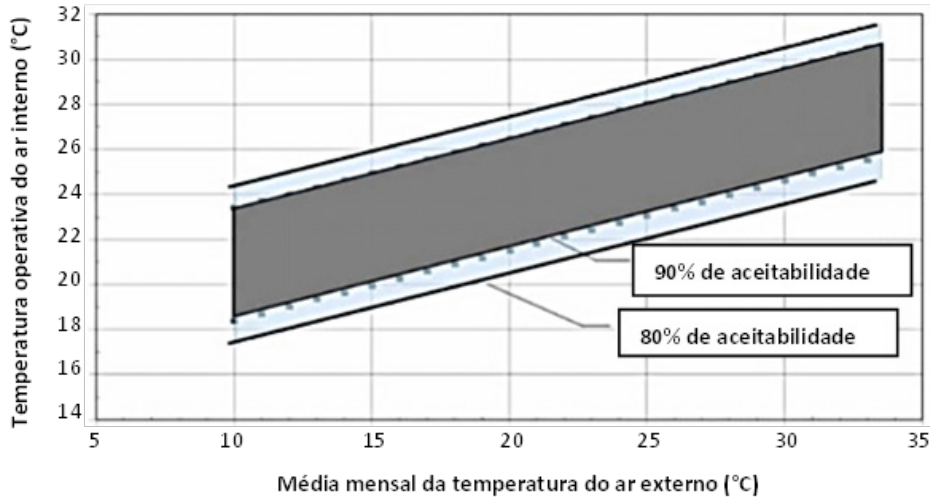


Figura 3.4 | Gráfico do Modelo Adaptativo | Fonte: Nicol et al (2012).

3.2.2. MODELO ADAPTATIVO - EN 15251 (2007)

A normativa europeia, assim como a ASHRAE 55, foi desenvolvida a partir de diversos trabalhos acerca do conforto adaptativo, mas em especial do de Dear (2004) sobre Conforto Térmico na Prática e do MacCartney e Nicol (2002) que aborda o desenvolvimento de um algoritmo de controle adaptativo para a Europa. Enquanto o diagrama da ASHRAE 55 é baseado na média mensal da temperatura externa, a normativa Europeia considera uma média semanal da temperatura do ar externo, por meio do peso exponencial médio operacional da temperatura externa diária (OLESEN, 2002). No diagrama da EN 15251, as temperaturas operativas internas permitidas são plotadas contra a temperatura média de operação externa (EN-15251, 2007).

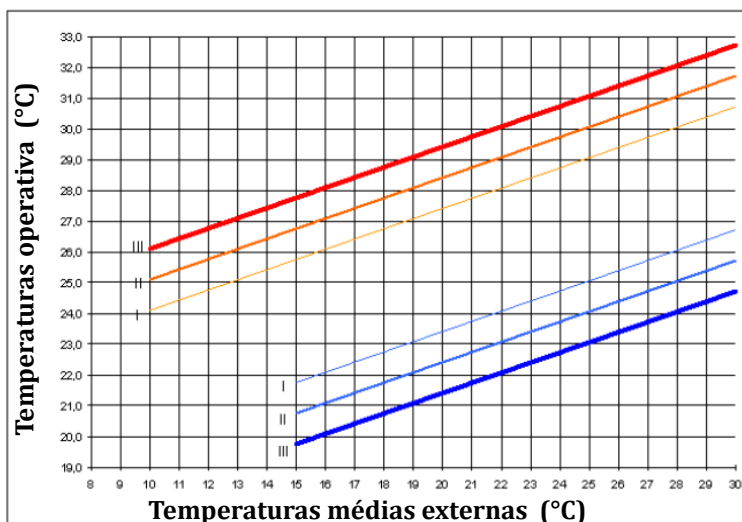


Figura 3.5 | Gráfico do Modelo Adaptativo - Europeu | Fonte: EN 15251 (2007).

Categoria I: Elevada expectativa (ocupante mais sensível). ($T_{conf.} = 0.33T_{mens} + 18.8 \pm 2$)

Categoria II: Expectativa normal (novos edifícios e renovações). ($T_{conf.} = 0.33T_{mens} + 18.8 \pm 3$)

Categoria III: Moderada expectativa (edifícios existentes). ($T_{conf.} = 0.33T_{mens} + 18.8 \pm 4$)

As temperaturas operativas internas são organizadas em categorias de acordo com o percentual de satisfação: Categoria I ~ 90%, categoria II ~ 80%, categoria III ~ 65% satisfação (OLESEN, 2002).

Olesen (2002) realizou uma análise comparativa entre os modelos adaptativo, aplicando-os para as cidades de Roma e Copenhagen. Na pesquisa o autor demonstrou que no geral, não há muitas diferenças, exceto que a média semanal fornece flutuações maiores da faixa de temperatura estimada.

Por fim, diversas pesquisas demonstram e questionam as restrições ou incipiência dos atuais índices de conforto térmico, em especial os de abordagem analítica em incorporar aspectos demográficos (como o tipo do edifício, o contexto climático e o perfil populacional) e sociais (como cultura e classe social) em suas formulações, conforme relatado em Mishra e Romgopal (2013); em Sansaniwal *et al* (2022); em Hensen, Loomans e Mishra (2016); em Karyono *et al* (2020); em Lamberts, Rupp e Varqués (2015).

Mishra e Romgopal citam que os padrões de índices atuais fornecem generalizações de dados globais para ajudar e informar os projetistas de edifícios, mas sempre que possível essas generalizações podem ser melhoradas por meio de levantamentos de campo locais. De acordo com Lamberts *et al* (2015), nos últimos 10 anos, diversas pesquisas ao redor do mundo desenvolveram vários novos modelos de conforto térmico adaptativo e levantamentos de campos que têm contribuído para a melhoria dos modelos de conforto térmico. Mishra e Romgopal (2013) sumarizam relevantes questões acerca dos modelos adaptativo, como:

- *As variações sazonais climáticas e as amplitudes térmicas, que, com exceção do clima tropical, os demais contextos climáticos apresentam faixas bastante amplas de temperatura neutra e zonas de conforto.*
- *As evidências disponíveis sugerem que as temperaturas neutras determinadas por meio de pesquisas de campo não mudam em intervalos de tempo razoáveis.*
- *Oportunidades adaptativas são colocadas em jogo com base em sua eficácia, facilidade de aplicação e economia. Os ocupantes sempre tentarão maximizar todos os três e podem empregar múltiplas ações adaptativas, em paralelo, para conseguir isso.*

Quando o dinheiro não é uma preocupação, as pessoas preferem “se entregar” ao uso da facilidade e eficácia de aparelhos como refrigeradores e condicionadores. A longo prazo, tal uso os torna menos dependentes de outras ações adaptativas.

Certas ações adaptativas, como abrir janelas, são populares em todos os tipos de clima, enquanto certas ações, como sentar em pisos frios, são limitadas por características climáticas e culturais.

Não obstante, Hensen *et al* (2016) alertam para a possibilidade de atrofiar partes dos múltiplos sistemas envolvidos na adaptação climática humana devido à desnecessidade de respostas regulatórias em um ambiente condicionado. As pessoas acostumadas ao resfriamento mecânico têm uma adaptabilidade térmica mais fraca em comparação com suas contrapartes acostumadas a espaços naturalmente condicionados (HENSEN *et al*, 2016). Ambientes estáticos e homogêneos que conduzem à monotonia térmica, uma solução dispendiosa e anteriormente preferida, estão dando lugar a ambientes dinâmicos, em que se privilegiam amplitudes térmicas mais amplas e a ventilação natural (LAMBERTS *et al*, 2015). Segundo os autores, o uso de sistemas de condicionamento personalizados é provavelmente a melhor maneira de aumentar a aceitabilidade do usuário com o ambiente térmico, em especial em edifícios em que o ocupante tem menor capacidade de adaptação, como os escritórios.

Embora existam muitos estudos de campo trazendo informações valiosas das pessoas em seus ambientes cotidianos e demonstram a relação pessoa-ambiente, as pesquisas ainda se concentram em espaços controlados (LAMBERTS *et al*, 2015). Diante das mudanças climáticas e o esgotamento dos combustíveis fósseis, o imperativo seria ter padrões e métodos de projeto adequados à edifícios mais flexíveis do ponto de vista térmico, que possam efetuar a economia de energia sem sacrificar o conforto (MISHRA e ROMGOPAL, 2013).

3.2.3. CONFORTO TÉRMICO EM RESIDÊNCIAS

A maioria dos estudos existentes em edifícios ocupados concentra-se em ambientes não domésticos, como escritórios e escolas, sendo menor as pesquisas acerca de espaços residenciais. Contudo, com o aumento do trabalho remoto ou híbrido e impulsionado pela pandemia de COVID, a relevância das habitações no campo da qualidade do ambiente interno têm ganhado protagonismo.

Os edifícios habitacionais proporcionam uma melhor interação entre o espaço e o usuário, facilitando a capacidade de adaptação térmica dos ocupantes. Quase todas as formas de adaptações se aplicam ao caso de edifícios residenciais: mudança atividade, adaptar roupas, abrir janelas, beber bebidas frias ou quentes, entre outras, o que a torna amplamente mais adaptável do que os edifícios de escritórios (PEETERS *et al*, 2009). Segundo os autores, a cena doméstica está longe do estado estacionário, tanto o nível de atividade, quanto o valor da roupa podem variar dentro de escalas de tempo pequenas, ganhos internos flutuantes podem afetar rapidamente a temperatura interna e a variação

da ocupação influenciarão, entre outros aspectos, a taxa de ventilação necessária.

Estas características são reforçadas por diversos estudos (BRAVO e GONZÁLEZ, 2013; BECKER e PACIUK, 2009; YANG et al, 2009; INDRAGANTI E RAO 2010) que indicaram diferenças entre as faixas da zona de conforto das temperaturas neutras dos atuais índices

Em relação às respostas dos usuários. As temperaturas do vote de sensação (TSV) obtidas por questionários aplicados aos usuários são menos restritas do que as temperaturas operativas consideradas para limitar as zonas de conforto. Em relação às temperaturas neutras (TN), durante os períodos de calor ou em regiões tropicais e subtropicais, as TSV tendem a serem mais elevadas do que as TN. Yan *et al* (2022), demonstraram que mais de 80% dos ocupantes dos edifícios residenciais pesquisados estavam satisfeitos, embora apenas 71,3% das temperaturas operativas internas medidas encontravam-se na zona de conforto recomendada pela norma ASHRAE 55-2020, respectivamente.

Observa-se então que as faixa de conforto das principais normativas são superestimada ou subestimada e podem ser revisadas, principalmente em contextos climáticos em que os usuários estão aclimatizados a temperaturas mais elevadas, representando um potencial de economia energética (LAMBERTS *et al*, 2015). Para Peeters *et al* (2009) e Hensen *et al* (2016) o cálculo da temperatura interna deve incorporar os efeitos de adaptação.

Outro fator importante na avaliação dos edifícios residenciais é a diversidade dos cômodos e, portanto, a necessidade de avaliações distintas do conforto. Os trabalhos acerca dos espaços residenciais normalmente focam nos ambientes de longa permanência, sendo estes salas e dormitórios. Na pesquisa de Peeters *et al* (2009) a habitação foi dividida em três zonas térmicas: banheiro, dormitórios e outros (sala e cozinha), isso porque no banheiro o usuário está nu e molhado, além da elevada umidade, enquanto no quarto a atenção volta-se ao superaquecimento. Outras zonas incluem principalmente cozinha, sala e escritório, em que maioritariamente os níveis de atividade são bastante baixos (0,7 met para reclinar a 2,0 met para cozinhar) e as roupas estão de acordo com as condições externas.

Para esta pesquisa em que os cômodos são integrados, o impacto mais relevante ao conforto do usuário será dos ambientes de longa permanência, em especial do dormitório. O dormitório é um ambiente crítico, visto que o ambiente térmico durante o sono é percebido pelo ser humano tanto cutaneamente estimulados quanto emocionalmente provocados (YAN *et al*, 2022). Segundo os autores, o sono é vital para estabilizar a energia, mantendo o sistema imunológico saudável, além disso, de ser benéfico para plasticidade cerebral e saúde mental. Ainda, durante o sono a capacidade de adaptação do usuário é limitada (DE DEAR *et al*, 2009) e, portanto, o espaço deve atuar mais preponderantemente na formatação do conforto.

Segundo Lin e Deng (2008), o efeito do isolamento térmico do sistema da cama na temperatura operativa é de aproximadamente 5,3°C por clo, o que afeta significativamente

a temperatura neutra durante o sono. Yan *et al* (2022), demonstraram que a temperatura no clima do leito flutuou em uma faixa muito mais estreita em comparação com o clima interno e o rosto tolera faixas de temperaturas mais elásticas do que o tronco. A faixa de temperatura operativa interna percebida como confortável na cabeça (parte exposta) é de 11,3°C a 21,9°C, enquanto a do tronco, coberta, variou entre 30,3°C a 32,5°C (YAN *et al*, 2022).

A temperatura interna para edifícios residenciais é projetada independentemente da noite e do dia e do uso dos ambientes, o que causa desperdício de energia e tende a proporcionar um desconforto na experiência humana. Não obstante, o conforto térmico nas habitações demonstrou uma forte dependência com o clima externo, principalmente com as temperaturas mais recentes (PEETERS *et al*, 2009). Diante das mudanças climáticas e o esgotamento dos combustíveis fósseis não é uma ideia absurda que, em um futuro próximo, a ventilação natural e os sistemas de refrigeração de baixo consumo de energia sejam os protagonistas em vez de coadjuvantes.

Por fim, se a tendência de crescimento exponencial de trabalhos na área se mantiver, é provável que as pesquisas em diversos assuntos da área sejam aprofundadas e novas formas de olhar para o conforto térmico sejam exploradas (LAMBERTS *et al*, 2015). De acordo com os autores, o conforto térmico é um tema complexo e estamos longe de compreender todos os seus aspectos inter-relacionados.

3.3. CONFORTO LUMINOSO

A luz natural se apresenta como importante estratégia de uso da energia solar para melhoria tanto da eficiência energética, como da qualidade do ambiente construído. A luz natural tem papel fundamental na qualidade visual, sendo a melhor fonte de luz para reprodução de cor e um importante regulador de alguns ciclos biológicos (LI, 2006). No entanto, a utilização da iluminação natural no ambiente interno apresenta uma série de complexidades, sobretudo em relação a sua sazonalidade, a sua componente térmica e ao seu alto nível de iluminância (entre 60.000 e 100.000lux). Tais complexidades desencorajam muitos profissionais a incorporá-la no desenvolvimento do projeto.

A sazonalidade da luz natural é de difícil mensuração, sendo influenciada pelo movimento do sol, pelo clima, pela qualidade do ar, por características físicas e geográficas (latitude, altitude, continentalidade, entre outros) e pela implantação do edifício (GONÇALVES *et al*, 2011). A sua incidência no interior do ambiente pode ocorrer de forma direta, proveniente da radiação direta do sol, difusa, da abóboda celeste e refletida, resultante dos reflexos em superfícies internas e externas.

Como se trata de uma fonte bastante dinâmica, foram necessários a criação de modelos matemáticos capazes de prever o comportamento da luz natural aproximando-se das

infinitas condições existentes. A Commission International de l'Eclairage (1995) apresenta uma compilação destes modelos, fazendo recomendações para a escolha do tipo de céu a ser utilizado nos cálculos de iluminação natural. (BRANDÃO, 2004). A CIE propõem cinco tipos de céu, mas três modelos são mais adotados, sendo um isotrópico e dois anisotrópicos. Os anisotrópicos consideram a distribuição variada de iluminância de acordo com a posição do sol.

- Isotrópicos: céu uniforme; céu encoberto padrão CIE.

- Anisotrópicos: céu claro padrão CIE; céu intermediários e médios.

Como todo modelo é reducionista, o critério de escolha do modelo de céu apropriado para determinada aplicação deveria corresponder ao que mais se aproxima da realidade (GONÇALVES *et al*, 2011). No Brasil, a ABNT (2005) considera, para efeito de cálculo da iluminação natural, o céu claro, o parcialmente encoberto (anisotrópico) e o encoberto (isotrópico) como modelos padrões de simplificação das variações de tipos de céus. A única norma vigente no Brasil que abarca o desempenho da iluminação Natural, a NBR 15575-2013 também se baseia no modelo de céu da ABNT, considerando em seu critério de avaliação preditiva o uso de céu teórico parcialmente encoberto.



Figura 3.6 | Tipos de céu | Fonte: Lamberts (2016)

Importante ressaltar que nenhum dos modelos, nem na ABNT nem na CIE, faz menção à aleatoriedade do comportamento das nuvens, sendo todos eles considerados aproximações aceitáveis da realidade nas condições em que foram desenvolvidos (BRANDÃO, 2004). Ainda, a maioria dos modelos não consideram a luz direta, devido sua distribuição heterogênea, seu potencial de ofuscamento e seu elevado nível de iluminância que pode comprometer o conforto visual. Tais simplificações, ao se afastarem das situações reais criam dissonâncias aos cálculos e contribuem para equívocos ou falhas na utilização da iluminação natural. Atualmente, há métodos dinâmicos, que por meio de simulações computacionais com base em arquivos climáticos, permitem modelagens muito aproximadas da realidade.

Em regiões tropicais e subtropicais é comum a alternância de luminâncias resultante da variação da nebulosidade, o que torna muitos dos cálculos baseados nas orientações

da ABNT incompatíveis com a realidade e afetam a eficiência do sistema de iluminação natural (GONÇALVES *et al*, 2011). O projeto de iluminação natural é dimensionado conforme a disponibilidade dessa fonte que, além do tipo de céu, será bastante influenciada pela latitude e clima. Quanto mais alta a latitude, mais restrito será o período de acesso ao sol no inverno e, conseqüentemente, da luz natural, o que dificulta a integração dessa fonte nos projetos de iluminação de interiores.

Nesse sentido, os modelos que consideram as condições climáticas para determinação dos tipos de céu conseguem uma aderência mais elevada com a situação existente. Há diversos modelos com tal abordagem, sendo o desenvolvido por Perez (1990), denominado “All weather model”, o mais amplamente utilizado.

MODELO DE PEREZ (1990): presume o padrão de iluminância do céu mais prevalente a partir da combinação de equações matemáticas com um conjunto de coeficientes derivados de dados coletados. Tal modelo apresenta a capacidade de parametrizar adequadamente as condições de insolação (Perez, 1990), ao caracterizar o céu e estimar a iluminância em função do índice de claridade do céu (ϵ) do ângulo zenital (Z), do índice do brilho do céu (Δ); do vapor de água na atmosfera (W).

Equação do índice de claridade do céu (ϵ): $\epsilon = [(IDh + I) / IDh + kZ^3] / (1 + kZ^3)$

Equação do índice do brilho do céu (Δ): $\Delta = (IDh \times m) / I0$

Equação do vapor de água na atmosfera (W): $w = \exp(0,07 * Td - 0,075)$,

onde:

IDh : radiação difusa horizontal (W/m^2);

I : radiação normal direta (W/m^2);

$I0$: radiação extraterrestre (W/m^2);

K : constante igual à 1,041 (adimensional);

Z : ângulo zenital (rad);

m : massa de ar óptica relativa;

Td : temperatura de orvalho (C°)

3.3.1. CONFORTO LUMINOSO | MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

Segundo a norma brasileira NBR 15215 (2005) de iluminação natural, a quantidade e a distribuição interna da luz dependem da disponibilidade de luz natural, obstruções externas, tamanho, orientação, posição e detalhes das aberturas, características óticas dos envidraçados, tamanho e geometria do ambiente, assim como, as refletividades das superfícies internas. Diversas métricas foram desenvolvidas para o cálculo da iluminação natural em edificações, categorizadas em manuais e dinâmicos.

Há diversos métodos manuais para análise da iluminação natural, que podem ser expressas em valores absolutos ou porcentagens e valores relativos. No entanto, os métodos manuais não permitem um dimensionamento ou uma avaliação dinâmica, o que limita os cenários a serem estudados. Esses métodos baseiam-se nos piores cenários de iluminação

natural prováveis, diante de premissas preestabelecidas, para identificar o mínimo de luz natural que estará disponível. O mais usual no Brasil é o método do Fator de Luz Diurna (FLD).

O FLD, segundo Hopkinson *et al* (1966), é uma medida da iluminação natural em um ponto de um dado plano, expressa pela relação da iluminação interna no ponto em questão com a iluminação exterior simultânea em um plano horizontal proveniente da totalidade de um céu não obstruído com uma distribuição de iluminâncias supostas ou conhecidas.

Este método considera a iluminação no interior do edifício com a razão da iluminação do céu no exterior. O fator de luz do dia (FLD) aborda à variabilidade da luz natural, analisando a contribuição da iluminação natural recebida no interior de uma edificação (PEREIRA, 2006). Na prática, os FLD podem ser calculados sem ter conhecimento da iluminação no exterior, desde que a distribuição de iluminância do céu seja conhecida em termos relativos (PEREIRA, 2010).

O FLD proposto pela CIE se baseia no céu totalmente encoberto, o que independe da orientação das aberturas por apresentar valor constante o ano inteiro e excluir do cálculo os efeitos da luz direta. Além disso, segundo Reinhart (2006), investigações pelo FLD não ajudam a desenvolver estratégias de prevenção ou previsão de ofuscamento para diferentes orientações de fachada.

a. MÉTRICAS BASEADAS NO CLIMA | MÉTODOS DINÂMICOS

Uma vez que a iluminação natural é uma característica presente na maioria dos edifícios ambientais, os interesses por estratégias nesse sentido têm aumentado, impulsionando melhorias das ferramentas de simulação e métricas de desempenho da luz natural (REINHART, 2006). Segundo a norma IES LM 83-12, “Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)”, a iluminação natural é notoriamente uma estratégia de desempenho difícil de ser avaliada. No entanto, nos últimos anos o progresso no acesso aos equipamentos e software, o aumento da difusão de conhecimentos, de pesquisas e de informações nessa área permitiram, uma significativa evolução das simulações computacionais de iluminação natural, principalmente em relação ao uso de métricas dinâmicas.

Os métodos de simulação computacional permitem uma análise mais detalhada da iluminação natural ao considerar uma ampla variedade de premissas e condições. Obviamente que há diversos níveis de modelagens que vão desde cálculos ainda estático, até simulações dinâmicas baseadas no clima, fidedignas de situações existentes e que possibilitam a composição de inúmeros cenários presentes e futuros. Os modelos de iluminação natural baseados no clima permitem a predição de diversos valores de radiação e luminosidade (por exemplo irradiação, iluminância, radiação, luminância) usando as condições de céu e sol derivadas de dados de bases meteorológicas (MARDALJEVIC, 2006). A

norma IES LM 83-12 considera que a intenção de tais modelos é de aprimorar o desempenho preditivo de métricas históricas e definir uma consistente metodologia de cálculo que possibilite a avaliação de múltiplas alternativas de projeto.

Segundo Reinhart (2006), a principal vantagem de métricas dinâmicas de desempenho da luz natural, em comparação às métricas estáticas é que aquelas consideram a quantidade e o caráter de variações diárias e sazonais da luz natural para um determinado local de construção em conjunto com eventos meteorológicos irregulares.

As métricas dinâmicas são ferramentas extremamente recentes que ajudam na interpretação do arquivo climático de dados reais capazes de descrever a variação temporal e espacial do céu, a ocorrência de insolação direta e os níveis de horários de iluminação natural absoluta (PEREIRA, 2010). As métricas mais conhecidas são a Autonomia da Luz Natural (DA), Autonomia Contínua da Luz Natural (DA), a Iluminâncias Úteis da Luz Natural (UDI), Exposição Anual à luz solar (ASE), Probabilidade de Ofuscamento da Luz Natural (DGP) e o Percentual de Aproveitamento da Luz Natural (PALN).

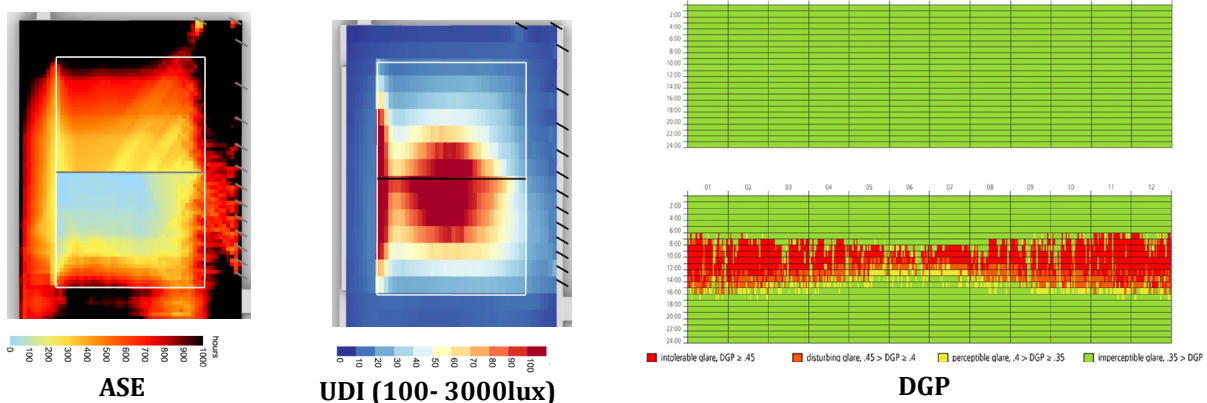


Figura 3.7 | Exemplos de avaliações dinâmicas da Iluminação Natural | Fonte: autoral

AUTONOMIA DA LUZ NATURAL (sDA – SPATIAL DAYLIGHT AUTONOMY): calcula a porcentagem de horas ocupadas por ano nas quais o nível mínimo de iluminância definido pode ser mantido apenas pela iluminação natural (REINHART, 2006). Esse sistema de avaliação é baseado em séries temporais de iluminância ou luminância dentro de um edifício, normalmente séries que se estendem sobre a totalidade do ano civil e baseiam-se em dados solares anuais de radiação externa do local do edifício em análise (REINHART, 2006). No entanto, o sDA não considera a iluminação artificial em sua composição e não permite a identificação de situações em que possa ocorrer desconforto devido ao excesso de iluminação, também não está integrado com avaliações térmicas.

A norma IES LM 83-12 refere-se às métricas dinâmicas de avaliação da luz natural e traz em seu conteúdo orientações e métodos padronizados de aplicação do das em complementariedade com a ASE (Annual Sunlight Exposure). A IES estabelece o limite mínimo de 300lux e tem como critério dois níveis de conformidade: 1. Preferível, em que

75% ou mais das horas úteis anuais atendem no mínimo 300lux; 2. Aceitável, com 55% ou mais do tempo atendendo o mínimo de 300lux. Ainda, a norma determina que as condições de iluminação natural devem ser baseadas em arquivos climático de ano meteorológico típico (TMY), com a análise de período diário de 10 horas, das 8:00 às 18:00.

AUTONOMIA CONTÍNUA DA LUZ NATURAL (DAACON- DAYLIGHT AUTONOMY CONTINUOUS):

Para suprir a deficiência apresentada pelo método da Autonomia da Luz Natural, Rogers *et al* (2006) propõe considerar a transição entre conformidade e não conformidade ao atribuir créditos às situações não atendidas. Essencialmente, a métrica reconhece que mesmo uma contribuição parcial da luz natural para iluminar um espaço ainda é benéfica (REINHART, 2006). Ainda, contabiliza-se também a luz solar direta ou excessiva, supondo que o limiar de condições potencialmente ofuscantes está correlacionado ao tipo de espaço.

EXPOSIÇÃO ANUAL À LUZ SOLAR (ASE - ANNUAL SUNLIGHT EXPOSURE): é a métrica que descreve o potencial de desconforto visual no interior de ambientes de trabalho. De acordo com a IES LM 83-12, é definida como o percentual da área do plano de análise em que a iluminância proveniente da luz direta do sol excede o valor de 1000lux em uma quantidade específica de horas, no caso 250 horas por ano. No cálculo da ASE considera-se padrões de nebulosidade anuais, como conforme os dados do Ano Meteorológico Típico (TMY) e céus de Perez, obstruções externas como edifícios e vegetação existentes, e obstruções internas, como divisórias opacas e sistemas de mobiliário anexos. Os limites estabelecidos para sDA e ASE devem ser atingidos simultaneamente nos ambientes analisados (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY, 2012).

ILUMINÂNCIAS ÚTEIS DA LUZ NATURAL (UDI): permite verificar qual porção do ambiente possui valores úteis e qual a porcentagem de ocorrência destes durante um ano, por meio da frequência de iluminância em um determinado tempo de acordo com faixas preestabelecidas (PEREIRA, 2010). Segundo Mardaljevic *et al* (2012), recentes pesquisas demonstraram que faixas entre 300 e 3000lux de iluminância da luz natural são percebidas como desejáveis ou pelo menos toleráveis pelos ocupantes em diferentes cidades. Além disso, o UDI é subdividido em duas categorias: suplementar e autônoma. Na suplementar, entende-se que quando a avaliação da iluminância natural está entre 100 e 300lux, dependendo da tarefa a ser executada, há necessidade de complementação com a iluminação artificial. Inferior a 100 lux é considerada não útil e superior à 3000 lux excessiva. Por tanto, entre 300 e 3000lux é considerada autônoma.

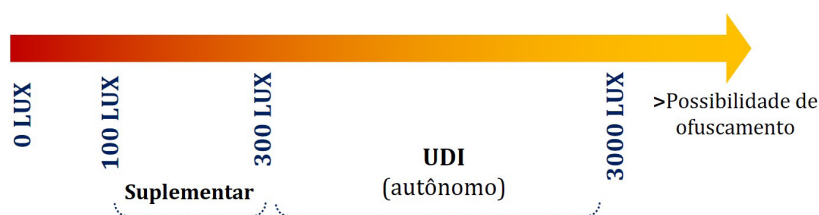


Figura 3.8 | Faixa de Iluminâncias Úteis | Fonte: autoral

Em 2011, Mardaljevic publica pesquisa que investiga o desempenho da iluminação natural em espaços residenciais utilizando o UDI como métrica de avaliação. Neste trabalho o autor afirma que os intervalos de UDI foram baseados em valores de pesquisas realizadas em espaços de escritórios e muitos deles antes das telas de LCD se tornarem tecnologia corriqueira. Em contraste com edifícios comerciais, as tarefas domésticas não são largamente direcionadas às telas e mesas de trabalho (MARDALJEVIC *et al*, 2011). Alia-se a isso as recentes descobertas dos efeitos benéficos da exposição regular de iluminâncias elevadas provenientes da luz natural na saúde a longo prazo (WEBB, 2006).

Por ora, é incerto a relação entre o comportamento do usuário de ambientes domésticos e comerciais, pois é claramente uma área com larga ausência de informações. Por essas razões, os autores acreditam que seja razoável supor um comportamento semelhante ao de espaços comerciais, porém com maior aceitabilidade, até mesmo recomendável, de limites superiores de UDI em espaços residenciais. Assim, sugere-se aqui que a ocorrência de iluminâncias superiores a 3.000 lux não deva ser, por concepção, eliminada por completo, e essa ocorrência moderada pode, de fato, ser benéfica (MARDALJEVIC *et al*, 2011).

No entanto, é importante ressaltar que a pesquisa foi conduzida em 10 cidades de clima temperado, como Moscou, Paris e Londres, e algumas considerações devem ser avaliadas ao aplicar tais conceitos em locais tropicais, como os abordados nessa pesquisa. O clima e a posição geográfica de cidades como São Paulo apresentam uma abundância de luz natural, raramente encontrada nos locais estudados por Mardaljevic e, portanto, o usuário padrão pode estar mais adaptado à ocorrência de valores elevados de iluminância. Além disso, os próprios autores atentam ao risco de ganho solar no verão, visto que essa alta disponibilidade de luz vem sistematicamente acompanhada de calor. Por fim, os autores reforçam que as escalas apresentadas devem ser tomadas como ilustrativas e sujeitas a revisão posterior, ao invés de conserva-la à perpetuidade.

PROBABILIDADE DE OFUSCAMENTO DA LUZ NATURAL (DGP): é um índice para avaliação do desconforto ocasionado por ofuscamento, que varia entre 0,2 e 0,8. Trata-se de índice preditivo desenvolvido por Christoffersen e Wienold (2006) a partir da correlação entre o desconforto de ofuscamento medido com as respostas dos usuários acerca do ofuscamento. O ofuscamento desconfortável, pode ser considerado perceptível ou imperceptível. Assim, a escala de DGP é dividida em quatro faixas: intolerável ($DGP \geq 0.45$); perturbador ($0.45 > DGP \geq 0.4$); perceptível ($0.4 > DGP \geq 0.35$); imperceptível ($DGP > 0.35$).

PERCENTUAL DE APROVEITAMENTO DA LUZ NATURAL (PALN): indica a quantidade de energia que pode ser economizada mediante o aproveitamento da luz natural e permite a comparação entre diversas estratégias de controle da iluminação artificial.

Em conjunto estas métricas possibilitam uma avaliação bastante ampla do efeito da luz natural no ambiente estudado, correlacionando o comportamento dos usuários e o tempo de

ocupação, aproximando-se sensivelmente da realidade. Ademais as simulações contribuem significativamente a melhoria do desempenho energético ao permitir uma integração mais efetiva da iluminação natural com a artificial, aumentando a eficiência do sistema.

Considerando que uma das principais características do território brasileiro é a abundância de luz natural é imperativo que os arquitetos dominem essa informação ao projetar (ALUCCI, 2006). Apesar dos diversos benefícios e da elevada disponibilidade já explicitados, a iluminação natural no Brasil é inadequadamente explorada nos projetos de arquitetura. De acordo com Lamberts (2014), isso advém da incipiência dos profissionais em relação aos conceitos necessários ao projeto adequado de iluminação e conforto visual.

3.3.2. QUESTÕES BIOLÓGICAS RELACIONADAS A ILUMINAÇÃO NATURAL

Atualmente, o acelerado adensamento e verticalização das cidades tem proporcionado condições ambientais do espaço construído bastante questionáveis. Tais problemáticas fomentam diversas pesquisas que buscam responder aos efeitos do meio urbano na saúde e bem-estar do ser humano. É diante desse contexto que se tem estreitado a relação entre iluminação e saúde, abordando temáticas como o acesso ao sol e ao céu e seus efeitos biológicos, fisiológicos e psicológicos. Tanto em escritórios como em residências o aumento da exposição à luz natural repercute na saúde, na produtividade e no psicológico das pessoas (MAK, 2014).

A luz afeta de duas formas a saúde humana, na regulação de ciclos metabólicos e a produção de vitamina. Nas últimas décadas pesquisas tem conduzido estudos que demonstram o impacto do acesso à luz natural na prevenção de doenças causadas pela deficiência de vitamina D. A interação da luz com a pele por meio de fotossíntese é responsável pela produção de vitamina D (BOUBEKRI, 2008).

Em 2002, pesquisas identificaram a relação entre o padrão de 24 horas de luz do dia e noite com a regulação dos ritmos biológicos e a produção de hormônio. A maioria das funções do corpo humano são controladas pelo hipotálamo, que responde pelas atividades autonômicas como o balanço energético, o crescimento, o ciclo circadiano entre outros. As células ganglionares da retina foram identificadas como uma conexão direta previamente desconhecida entre o olho e o núcleo supraquiasmático (SCN), núcleo central do hipotálamo. Responsável pelo ritmo circadiano dentro do cérebro de mamíferos, que impulsiona os ciclos diários de vigília-sono, bem como certos níveis hormonais (REINHART, 2006).

Assim, o corpo humano deve receber esses sinais com a quantidade certa de luz e no tempo e na frequência correta. A variação da luz do dia serve como catalisadora para a secreção dos hormônios de melatonina e de serotonina pela glândula pineal. A quantidade de melatonina determina os níveis de energia e atividade do corpo. A variação da luz do dia controla a produção da melatonina, que durante o período noturno é aumentada. Durante o

dia inverte-se, e a produção de serotonina, relacionada ao estado de vigília, que é acrescida. Quando isso não ocorre, o relógio biológico é alterado e diversas disfunções são ocasionadas.

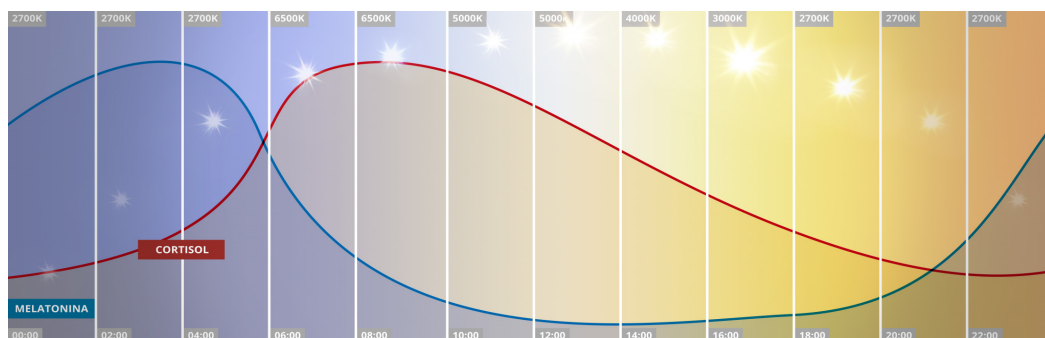


Figura 3.9 | Ciclo de produção hormonal de acordo com a luz do dia - Sistema Circadiano | Fonte: bellaluce.com.br

A ausência dos estímulos naturais provenientes do ciclo de iluminação do dia pode desregular a produção de importantes hormônios que ocasionam distúrbios no sono noturno e dificuldades de concentração durante o dia. O padrão de vida urbano tende a concentrar as pessoas em espaços com pouco ou inadequado acesso à luz natural, o que tem contribuído para a contínua desregulação dos relógios internos (BOUBEKRI, 2008). As atuais alternativas de iluminação artificial não respondem igualmente às variações da luz natural, o que impõem a necessidade de acesso ao sol e ao céu em ambientes fechados.

Ainda, a exposição às fontes de luz que possuem espectros semelhantes ao das horas de maior intensidade da luz do dia durante os períodos de transição da vigília para o sono, além de afetarem a qualidade do sono, também alteram a produção de hormônio. Estas condições tendem a estimular os hormônios de alerta como serotonina e cortisol e inibir a produção de melatonina, que podem resultar em severos danos à saúde à longo prazo se ocorridos continuamente.

Aliado a isso, a radiação solar também pode ser utilizada como fator bactericida. Ambientes sem incidência de sol, especialmente residências e áreas molhadas, podem acumular fungos e outros microrganismos nocivos à saúde. (OBOLENSKY e KORZIN, 1982). Ademais, a comunicação com o ambiente exterior também apresenta efeitos psicológicos relacionados à percepção visual, ao estado emocional e às sensações de satisfação dos ocupantes (MAK, 2014).

Portanto, a necessidade de garantir o acesso ao céu e ao sol nos ambientes internos se torna crucial à promoção da qualidade de vida das pessoas, uma vez que a tendência é de se passar maior parcela do tempo em ambientes fechados. Indicadores de controle da obstrução do céu, como os propostos por Hopkinson, Petherbridge e Longmor (1966) e Littlefair (2001), tem como objetivo preservar o acesso à iluminação proveniente da abóbada celeste. Estes consistem na limitação de ângulos sob os quais a visão do céu deve estar desobstruída, partindo de um ponto na fachada ou limite do terreno, garantindo à edificação condições mínimas de acesso à luz natural, assim como de insolação (PEREIRA,

2006).

3.4. PROCESSO INTEGRADO (IDP) E TOMADA DE DECISÕES EM FASES INICIAIS DE PROJETO (MAKING DECISION IN EARLY-DESIGN)

O processo de projeto de edifícios modernos é complexo devido às rígidas exigências dos usuários, aos requisitos regulatórios, bem como uma quantidade crescente de opções de projeto resultante do acelerado desenvolvimento tecnológico (PETERSEN *et al*, 2011). Nesse sentido, estabelecer uma visão ampla das combinações de soluções de projeto que respondam ao desempenho almejado pode representar tarefa difícil aos projetistas, por requer o gerenciamento de uma grande quantidade de dados acerca da geometria e das propriedades físicas dos componentes e sistemas da construção. Ademais, esses dados precisam ser processados antes que qualquer coisa possa ser afirmada sobre o desempenho (por exemplo, necessidade de energia e qualidade do ambiente interno) (PETERSEN *et al*, 2011).

Para Hensen *et al* (2012), a integração de estratégias ativas e passivas durante as fases iniciais do projeto é extremamente complexa, demorada e requer um alto nível de especialização e programas de difícil acesso. No entanto, é na fase inicial do processo de projeto que uma série de decisões são tomadas e exercerão forte influência sobre o desempenho do edifício durante o restante do processo (PETERSEN *et al*, 2011). Nesta fase, os arquitetos estão em constante busca por uma direção de projeto para tomar uma decisão informada e orientar o desenvolvimento de projeto, sendo que as decisões tomadas durante esta fase irão impactar o desempenho e o custo final (HENSEN *et al*, 2012; OSTERGARD *et al*, 2016). Para projetar e construir edifícios com elevado desempenho é importante garantir a tomada de decisão informada durante as fases iniciais do projeto, isso inclui a integração de ferramentas de simulação de desempenho de construção (BPS) no início do processo de projeto (HENSEN *et al*, 2012).

Contudo, a aplicação e o uso das ferramentas de simulação do desempenho ambiental estão focados na verificação do desempenho e não no suporte ao desenvolvimento do projeto (PETERSEN *et al*, 2011). O problema em não usar as ferramentas de simulação para o suporte de projeto é que a oportunidade de alteração

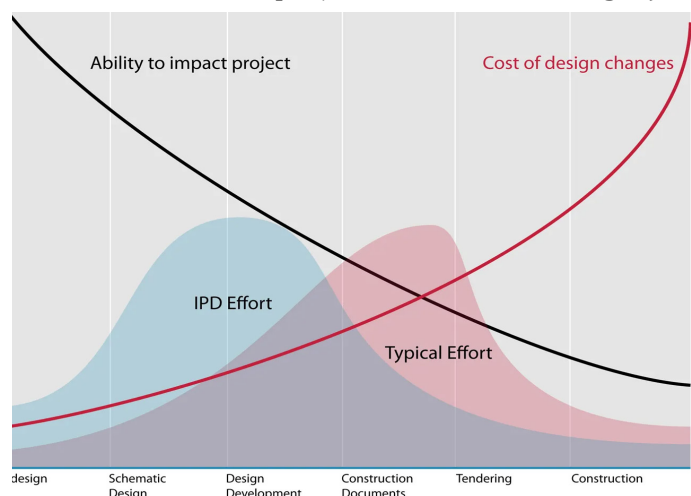


Figura 3.10 | Curva de MacLeamy do processo de projeto com as curvas de oportunidade x de custo de alteração | Fonte: www.danieldavis.com/macleamy/

diminui e os custos das mudanças aumentam à medida que o processo de projeto avança, conforme demonstrado na figura 3.10. A previsão das consequências das decisões iniciais é particularmente difícil, porém crucial, uma vez que decisões equivocadas podem reduzir o universo de soluções adequadas e tornar as metas de alto desempenho mais árduas e onerosas, limitadas a respostas sub ótimas (OSTERGARD *et al*, 2016).

As técnicas de simulação do edifício - building performance simulation (BPS) podem ser úteis quando integradas ao início do processo de projeto arquitetônico. A simulação na teoria lida com investigações dinâmicas e interativas de projeto, o que a torna eficaz para permitir que novos conhecimentos, processos analíticos, dados de materiais e componentes, entre outros sejam incorporados e tornados acessíveis aos profissionais da prática de projeto (HENSEN *et al*, 2012). No entanto, segundo Hensen *et al* (2012), apesar da proliferação de ferramentas BPS as barreiras ainda são altas (figura 3.11 sumariza as barreiras) e das 392 ferramentas de BPS listadas pelo departamento de energia americano (DOE-U.S, 2011), menos de 40 são direcionadas aos arquitetos e aplicáveis em fases iniciais do projeto. Os arquitetos sofrem com as barreiras das ferramentas BPS durante esta fase decisiva, que é mais focada em abordar a geometria e o envelope do edifício (HENSEN *et al*, 2012).

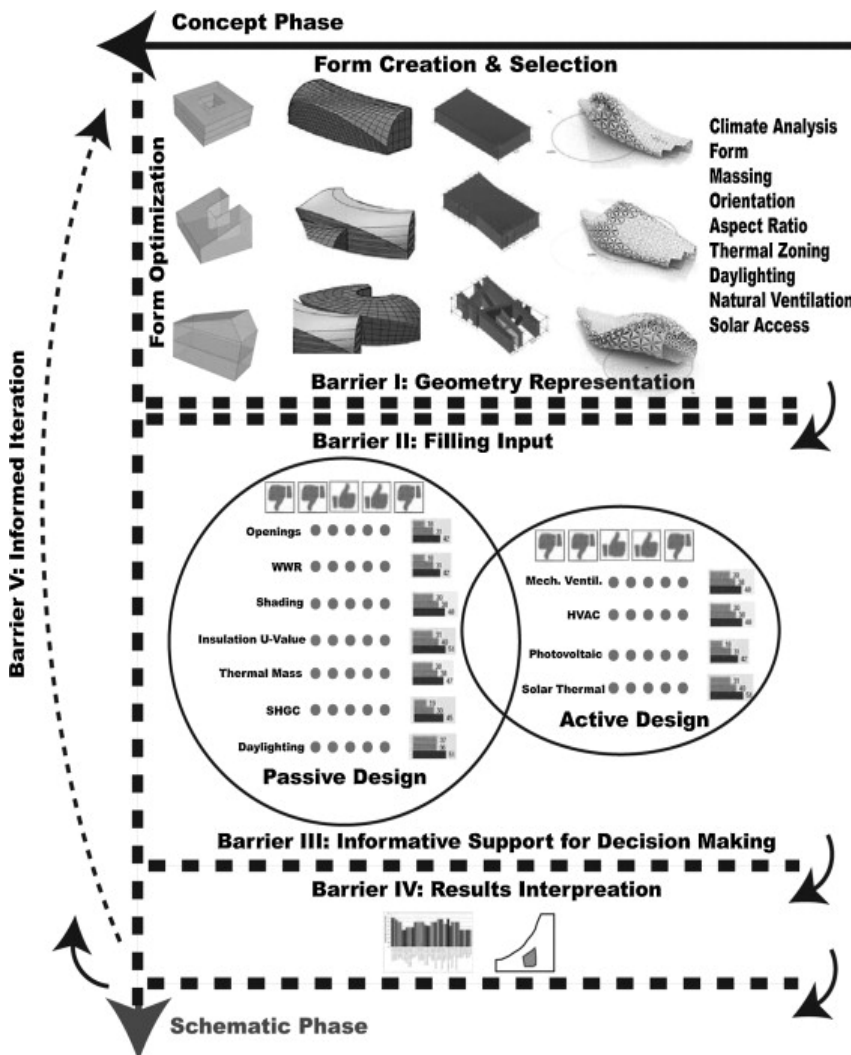


Figura 3.11 | Barreiras da inserção das ferramentas BPS no processo de projeto | Fonte: Hensen *et al* (2012)

Pesquisadores têm identificado três desafios primários à aplicação de simulações em fases iniciais de projeto: incertezas do projeto, elevado tempo de processamento e oneroso esforço de modelagem (SINGH et al, 2020).

1. Incertezas do Projeto: a maioria dos parâmetros é flexível e desconhecido no início do projeto, essa flexibilidade e falta de informações é expressa como incertezas. Quanto maior a incerteza nos parâmetros, maior incerteza nas respostas e o projetista precisa reduzir a incerteza, concentrando-se nos parâmetros que sejam relevantes ao desenvolvimento da solução de projeto. Nesta situação, os resultados do BPS são valiosos para avaliar o efeito da alteração dos parâmetros de projeto no desempenho energético, que pode se dar por meio da análise de sensibilidade (SINGH et al, 2020). Além disso, a avaliação comparativa de soluções de projeto requer uma abordagem estatística sob incerteza (SINGH et al, 2022).

2. Elevado Tempo de Processamento: há diversas abordagens que focam na redução do tempo de processamento, permitindo a exploração do universo de soluções, como metamodelos, análises estatísticas e machine learning. Como nas fases iniciais de projeto a maioria das informações são incertas, o objetivo primário das simulações é exploratório, em vez de previsões precisas (SINGH et al, 2022).

3. Oneroso Esforço de Modelagem: o esforço de modelagem de simulação em fases iniciais de projeto é uma barreira significativa ao projeto (SINGH et al, 2022). As abordagens atuais para obter resultados BPS determinísticos precisam de adaptação para resultados BPS probabilísticos. Para tanto, é necessário o estabelecimento de uma interoperabilidade mais perfeita entre modelos de projeto - computer aided design (CAD) e ferramentas BPS, o que tem se demonstrado promissor. Assim que o modelo de simulação for combinado com os modelos CAD ou BIM, aquele poderá realizar rápidas previsões alinhadas ao processo de projeto (SINGH et al, 2022). No entanto, a maioria das ferramentas BPS ainda são avaliativas, fornecendo pouca ou nenhuma orientação, sem considerar a variabilidade e as incertezas (OSTERGARD et al 2017).

Além desses três desafios, a falta de informação, o vasto universo de soluções e as rápidas alterações de projeto são fatores que também contribuem para a dificuldade de implementação de tomadas de decisões baseadas em simulações nas fases iniciais de projeto (OSTERGARD et al 2017). Contudo, observa-se um movimento no ambiente acadêmico que visa aprimorar o uso de ferramentas de simulação de edifícios nos estágios iniciais do projeto de edifícios. Segundo Petersen et al (2011), ferramentas novas ou existentes com interfaces facilitadoras e suporte para exploração de dados são frequentemente apresentadas em conjunto com propostas de procedimentos e metodologias para integrar o seu uso no processo de projeto de edifícios, como por exemplo Petersen e Svendsen 2011 e Ostergard 2016.

Segundo Ostergard *et al* 2017, o foco está em métodos que permitem ao projetista investigar um espaço global de soluções, que é expandido a partir da variabilidade dos múltiplos parâmetros de projeto, reduzindo o tempo de processamento. Isso se deve ao fato de que uma única simulação de desempenho avalia apenas um único ponto no espaço de projeto sem levar em conta incertezas e variabilidade. A tendência é que os projetistas realizem simulações paramétricas manuais ou automatizadas, variando um parâmetro por vez, a denominada análise de sensibilidade local, one-at-a-time (OAT). Nessa abordagem, não é possível identificar efeitos de interação, relações entre saída e entrada, revelar entradas não influentes e demonstrar regiões do espaço de entrada que atendem a certos critérios (OSTERGARD *et al*, 2017). Na fase inicial de projeto, muitos parâmetros podem ser variados ao mesmo tempo e para a exploração do universo de soluções do projeto de forma global as análises de sensibilidade global se fazem mais pertinentes. A análise de sensibilidade global permite a variação simultânea dos parâmetros de entrada do modelo e a sua aplicação no contexto de simulações de desempenho de edifícios é abordada em profundidade por Tian (2013). A figura 3.12 ilustra a comparação entre a abordagem local e a global.

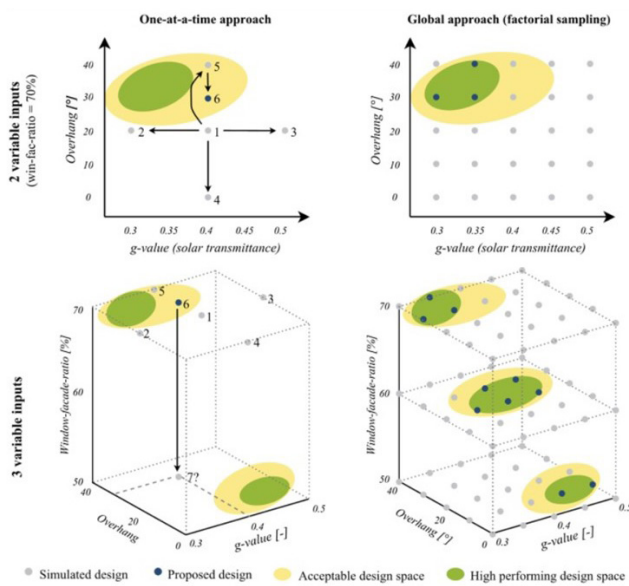


Figura 3.12 | Comparação entre a abordagem One-at-a-time (esquerda) e a global de exploração do espaço (direita) quando considerado apenas 2 variáveis (acima) e 3 variáveis (abaixo). Os círculos verdes e amarelos representam as soluções favoráveis. | Fonte: Ostergard *et al* (2016)

Ostergard *et al* (2017) em sua pesquisa sobre os desafios relacionados às simulações nas fases iniciais de projeto apresenta a categorização das principais abordagens utilizadas para enfrentar tais desafios. O autor categoriza as abordagens em seis grupos, cada uma delas visando um ou mais desafios específicos, conforme ilustrado na figura 3.4. A seguir descreve-se cada grupo de acordo com as definições estabelecidas por Ostergard.

SIMULAÇÕES PROATIVAS (PROACTIVE SIMULATIONS): referem-se a uma exploração proativa do espaço de projeto para orientar o projeto em vez de avaliar o projeto. A maioria dos programas de simulação são usados para verificar o desempenho, não tendo a capacidade de orientar o projetista para edifícios com melhor desempenho. Observa-se o desenvolvimento de ferramentas focadas em simulações proativas, como os protótipos propostos por Hensen *et al* (2012), Petersen (2011) e Capeluto e Ochoa (2009). Estas

permitem a criação rápida de uma série de projetos alternativos com ênfase na fase inicial do projeto, combatendo a típica abordagem de tentativa e erro.

Métodos Estatísticos (Statistical Methods): incluem a execução de um grande número de simulações e a aplicação de medidas estatísticas. Além de lidar com as incertezas, uma abordagem estatística pode facilitar a exploração de um grande universo de soluções ao identificar correlações e interdependências entre parâmetros de entradas, classificando-os pelo grau de importância. Há também trabalhos, como os de Manfren et al (2013) e Cheng e Cao (2014), que fazem uso de simulações paramétricas ou bancos de dados de desempenho para construir meta-modelos que permitem avaliações rápidas por terem poucas entradas (OSTERGAD, 2017). No entanto, os metamodelos são válidos apenas nos domínios em que foram construídos. Por fim, a análise multivariada e as técnicas de filtragem são eficazes ao analisar grandes quantidades de dados de simulação para orientar os tomadores de decisão.

Holístico (Holistic): inclui o cálculo de muitos objetivos de desempenho interdependentes e a combinação dos resultados para apoiar a tomada de decisões. A necessidade de abordar objetivos múltiplos e contraditórios enfatiza uma abordagem holística durante todas as etapas do processo de projeto. Os meios para fazer isso são diversos e incluem sistemas de pontuação ponderada, interoperabilidade CAD-BPS aprimorada, processos de hierarquia analítica e gráficos de sensibilidade de múltiplos objetivos. Exemplos de importantes objetivos interdependentes são demanda de energia, conforto térmico e luz natural.

Otimização (Optimization): ajuda a automatizar a exploração de um grande universo de soluções e orienta o projeto para alto desempenho. Motivados pelos requisitos rigorosos e muitas vezes divergentes de edifícios de alto desempenho, os algoritmos de otimização tornaram-se cada vez mais populares na academia nos últimos dez anos. Uma importante desvantagem é que a otimização carece de medidas qualitativas, como estética, layout do espaço e logística, que são parâmetros críticos no projeto inicial.

Interoperabilidade CAD-BPS (CAD-BPS Interoperability): pode ser obtida pela integração de modelos, acoplamento em tempo de execução e esquemas compartilhados. Uma ambição comum é garantir uma modelagem rápida e consistente. As diferentes abordagens para a interoperabilidade CAD-BPS podem ser divididas em quatro categorias: a) integrada, b) interoperável em tempo de execução, c) troca de arquivos e d) autônoma. Observa-se uma evolução acelerada das ferramentas com uma ampla variedade de aplicativos complementares que ganham vida na academia e em comunidades de código aberto. O campo está evoluindo rapidamente, mas ainda precisa superar obstáculos difíceis, sendo um importante desafio a colaboração de vários entre os vários agentes do projeto. Por vezes as empresas se unem de maneira diferente para cada projeto e têm diferentes ferramentas e abordagens de projeto.

Conhecimento Baseado em Métodos (Knowledge Based Inputs): visam reutilizar e compartilhar conhecimento para reduzir o tempo gasto na modelagem e buscam melhorar a consistência e a validade. Além disso, os bancos de dados podem ser usados para definir valores padrões permitindo simulações no momento de projeto onde há ausências de informações. Os bancos de dados de fornecedores geralmente são rígidos e foram feitos para simulações detalhadas nos estágios finais do projeto. O uso de entradas padrão pode limitar a exploração do universo de soluções, pois atuam como restrições para possíveis cenários a serem considerados.

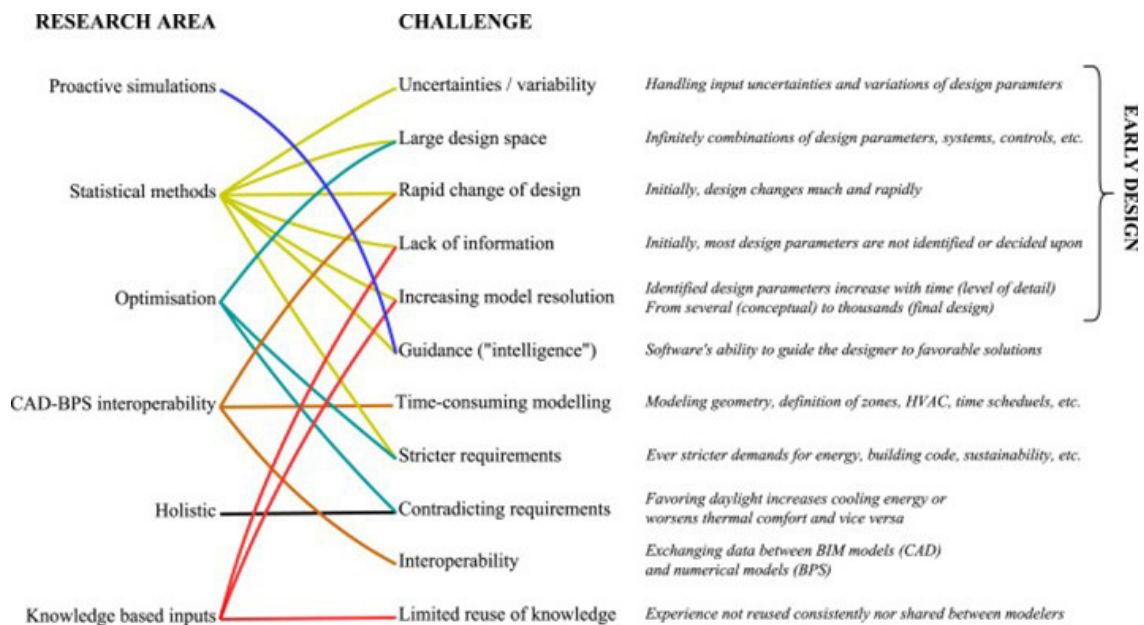


Figura 3.13 | Revisão das pesquisas na área e a relação entre as diferentes desafios de inserção das BPS no início do processo de projeto | Fonte: Ostergard et al (2016)

Essa pesquisa utiliza o método estatístico para a investigação do universo de soluções em etapa de concepção, uma vez que a integração inicial do projeto pode ser facilitada por meio do uso deste. Os métodos estatísticos permitem que o modelador explore um grande universo de soluções de maneira sistemática, o que potencialmente amplia o espaço de cenários estudado e, conseqüentemente, melhora o desempenho (OSTERGARD, 2017). A análise estatística permite a definição de entradas na forma de extensões possíveis e são adequadas para enfrentar os desafios relacionados à natureza probabilística do comportamento do usuário e do clima. A modelagem estatística de desempenho tende a abordar três disciplinas interligadas: análise de incerteza, análise de sensibilidade e análise multivariada. O fluxo de trabalho comum ao uso desse método está resumido na figura 3.14, onde:

1. Um modelo base é criado para início das simulações de desempenho capaz
2. Dependendo do escopo da análise, vários parâmetros de entrada, variando de alguns a centenas, são selecionados. Cada parâmetro é atribuído com uma função de densidade

de probabilidade que reflete a incerteza do parâmetro relacionada ao modelo numérico, condição de limite, propriedade física ou variabilidade do projeto.

3. Uma matriz de amostra é construída a partir das funções de densidade de probabilidade. Existem vários procedimentos de amostragem e sua aplicabilidade depende da análise a ser realizada. Os procedimentos de amostragem incluem aleatório, estratificado, fatorial etc.

4. Para cada amostra, uma simulação é realizada e os dados de saída são coletados.

5. Os resultados são averiguados utilizando análise de incerteza, análise de sensibilidade, análise multivariada ou combinações destes. Os resultados também podem ser usados para criar metamodelos.

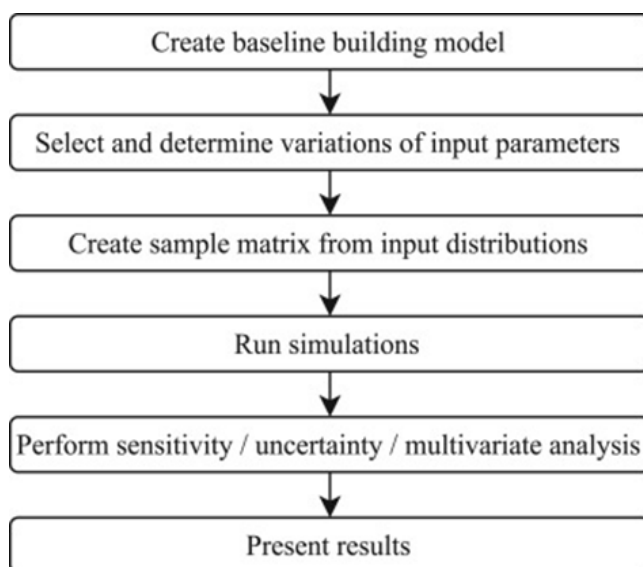


Figura 3.14 | Fluxo de trabalho padrão do método estatístico | Fonte: Ostergard et al (2016)

Esse fluxo de trabalho geralmente é facilitado pelo uso de pacotes de programas estatístico ou a linguagem de programação estatística R em combinação com programas de simulação do desempenho. Na pesquisa também foi utilizado o programa de estatística minitab (www.minitab.com/pt-br) e o programa de parametrização colibri (www.thorntontomasetti.com/capability/tt-toolbox-grasshopper), sendo este um plugin do grasshopper. Além disso, a pesquisa também aplica a abordagem holística, uma vez que tem com múltiplos dados de saída (térmica e luz natural) que implicou a formulação de uma função objetiva para combinação dos resultados.

Por fim, para facilitar a integração das simulações nas fases iniciais Ostegard *et al* (2017) propõem uma estrutura de simulações proativas, inteligentes e baseadas na experiência, ilustrada na figura 3.15. A estrutura proposta incorpora métodos promissores e ideias da literatura, entre outros: banco de dados flexível e baseado em experiência para consistência e configuração rápida; análise de incerteza e sensibilidade para explorar o universo de soluções e garantir robustez; uma abordagem holística considerando objetivos múltiplos e contraditórios (por exemplo, energia, conforto térmico e luz natural).

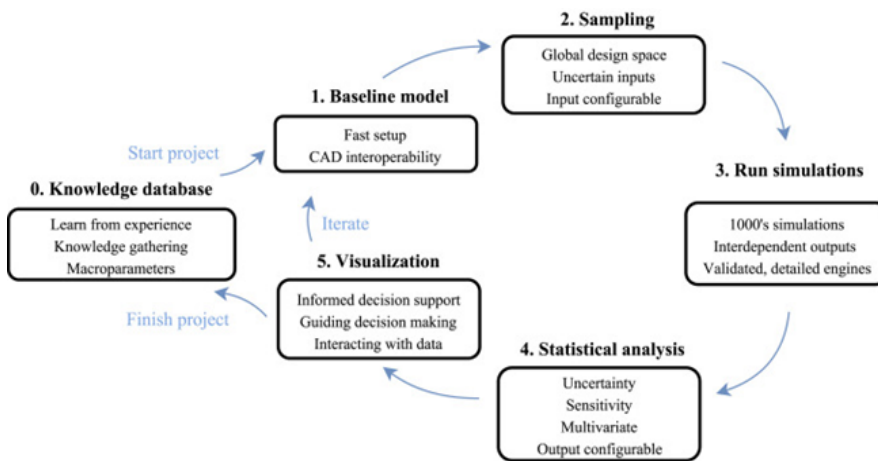


Figura 3.15 | Fluxograma da estrutura proposta por Ostergard | Fonte: Ostergard et al (2016)

3.4.1. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

O incremento da complexidade das modelagens computacionais tem evidenciado a questão da identificabilidade do modelo, ao reconhecer a importância de se compreender as contribuições dos parâmetros de entrada em relação ao desempenho e ao propósito da simulação (Guillaume et al., 2019, Douglas-Smith et al., 2020). Nesse sentido, as análises de sensibilidade contribuem ao adequado desenvolvimento do modelo ao investigar as relações entre os parâmetros de entrada e os dados de saída de um modelo de simulação (Northon, 2015). Tais análises referem-se também aos métodos e abordagens aplicados que irão auxiliar no entendimento da importância relativa de cada parâmetro de entrada dentro de um determinado contexto (Douglas-Smith et al., 2020).

Diversos autores, como Hensen et al (2009), Shen e Tzempelikos (2013) e Hemsath e Bandhosseini (2015), sugerem incorporar a análise de sensibilidade durante o projeto inicial para identificar os parâmetros de entrada com maior impacto no desempenho do edifício. Distingue-se como uma boa prática ao identificar quais são os parâmetros mais importantes e se precisam de refinamento, sendo possível simplificar ou até mesmo suprimir as partes com pouca influência nos dados de saída abarcados (Northon, 2015). Não obstante, ao identificar os parâmetros de entrada mais influentes, a equipe de projeto pode direcionar sua atenção para essas entradas em análises subsequentes, como variações e otimização de parâmetros (OSTERGARD, 2017). A análise de sensibilidade pode responder a perguntas “e se” calculando regressão ou coeficientes de correlação que indicam o tamanho e a direção da mudança no desempenho ao alterar os valores para uma determinada entrada.

A análise de sensibilidade pode ser dividida em abordagens locais e globais. Métodos locais, one-at-a-time (OAT), baseados em derivativos consideram os efeitos de entradas incertas em torno de um ponto no universo de soluções, variando um parâmetro por vez (SALTELLI et al, 2008). Segundo os autores (2008), essa abordagem requer poucos cálculos, mas é inadequada para sistemas não lineares. Os coeficientes de sensibilidade local pré-projeto podem auxiliar na tomada de decisão inicial e podem ser estendidos para análise

global em um estágio posterior de otimização do projeto (HEMSATH e BANDHOSSEINI, 2015)

Os métodos globais consideram as entradas incertas em todo o espaço de entrada, o que imprime versatilidade as análises, pois podem lidar com sistemas não lineares, não aditivos e não monótonos e consideram os efeitos das interações entre as entradas (SALTELLI *et al*, 2008). Como exemplo de um sistema não linear e não monótono em BPS, podemos considerar o consumo de energia em função do valor g do Windows (OSTERGARD, 2017). Para um determinado modelo, a carga de aquecimento no inverno pode ser reduzida aumentando o valor g, mas apenas até um certo limite após o qual a carga de resfriamento aumentará. No entanto, essa relação é altamente dependente de outros parâmetros, como fenestração, sombreamento solar, sombras, pontos de ajuste, cargas internas etc (OSTERGARD, 2017).

Há diversas técnicas que podem ser aplicadas as sensibilidades globais, Smith *et al* (2020) em sua pesquisa de revisão das técnicas e ferramentas destinadas às análises de sensibilidade listou as 15 técnicas mais comumente aplicadas no ambiente das simulações ambientais. O método de regressão aliado a técnica de Monte Carlo são os mais amplamente utilizados para a análise de sensibilidade global. As simulações de Monte Carlo se baseiam na realização de múltiplas avaliações com pontos amostrados aleatoriamente de entradas do modelo de acordo com suas funções de densidade de probabilidade correspondentes e, em seguida, usando os resultados dessas avaliações para determinar a incerteza nas previsões do modelo (TIAN, 2013).

Os indicadores das regressões, após a realização da Simulação de Monte Carlo, em modelos lineares ou pelo menos monotônicos para cada uma de suas entradas, podem determinar as contribuições das entradas como o SRC (standardized regression coefficients), SRRC (standardized rank regression coefficients) ou outros indicadores (TIAN, 2013). Outra técnica amplamente utilizada é o método de regressão stepwise. Neste, o fator de maior importância primeiro entra no modelo e depois o próximo fator importante também entra no modelo, e repete esse processo até que nenhuma variável seja significativa em termos de teste estatístico. O critério de seleção inclui SRC, valores t, quadrado R ajustado e critério de informação de Akaike (TIAN, 2013).

Segundo Tian (2013), diversos métodos foram desenvolvidos com diferentes propósitos. O método fatorial e o método de Morris são geralmente empregados para isolar os poucos fatores dominantes entre uma grande quantidade de entradas. O método de Morris permite a filtragem dos parâmetros indicando quais devem ser incluídos em etapas posteriores. Com um número modesto de execuções de modelo, ele classifica os parâmetros de acordo com a influência em cada saída e a extensão da não linearidade (TIAN, 2013). A convergência dos índices de sensibilidade tende a ocorrer com um número relativamente pequeno de avaliações do modelo e, portanto, é comumente usada para triagem de fatores

(SMITH *et al*, 2020).

O método funciona escalando m parâmetros ao longo de r trajetórias, onde r é tipicamente menor que m e cada trajetória consiste em m passos de um único parâmetro. Os parâmetros são todos perturbados uma vez, por sua vez, na trajetória, sendo os pontos de partida aleatórios e uniformemente distribuídos com os parâmetros escalonados em ordem aleatória (NORTON, 2015). A amostra resultante consiste nas alterações da saída do modelo causadas pela perturbação de cada parâmetro. Grande desvio padrão indica que o efeito depende fortemente dos valores dos parâmetros e uma grande média dos valores absolutos das alterações indica grande influência desse parâmetro (NORTON, 2015). O objetivo é identificar e fixar entradas insignificantes que tenham influência nula ou desprezível no desempenho do edifício (OSTERGARD *et al*, 2017).

Quando o propósito é exploratório utiliza-se a abordagem estocástica para executar um conjunto exaustivo de simulações do universo de soluções (OSTEGARD, 2017). Segundo o autor, a aplicação de métodos de filtragem e análises multivariadas posteriormente as simulações ajuda a identificar áreas favoráveis do universo de projeto que atendem a certos critérios de projeto. Além disso, a análise multivariada da vasta quantidade de dados obtidos de milhares de simulações pode ser auxiliada por várias técnicas de visualização, como gráficos de dispersão, histogramas e gráficos de coordenadas paralelas. Para viabilidade dessa abordagem é fundamental que se realize modelagens parametrizadas, em que as simulações são automatizadas para realizar todas as combinações entre os parâmetros de entrada.

3.4.2. MODELAGEM PARAMETRIZADA

Basicamente, o termo paramétrico tem origem na matemática e refere-se ao uso de certos parâmetros ou variáveis, que podem ser alterados para manipular os resultados da equação (ELTAWEEL e SU, 2017). Assim, o princípio do projeto paramétrico pode ser definido como projeto matemático, onde as relações entre os elementos do projeto são mostradas como parâmetros que podem ser reformulados para gerar geometrias complexas, essas geometrias são baseadas nos parâmetros dos elementos, alterando esses parâmetros; novas formas são criadas simultaneamente (ELTAWEEL e SU, 2017).

A integração do projeto paramétrico por meio de ferramentas de simulação de desempenho deu ao usuário a capacidade de testar, comparar e selecionar a melhor solução para problemas multiobjetivos, como os encontrados no ambiente construído (GONZÁLEZ e FIORITO, 2015). Ao mesmo tempo, plug-ins são desenvolvidos para vincular essas ferramentas ao BPS, permitindo assim suporte orientado a dados para modelagem em estágio inicial, paramétrica e geométrica, sendo provavelmente a ferramenta mais usada o grasshopper (www.grasshopper3d.com). A capacidade de adicionar vários plug-ins à

modelagem paramétrica pode ser uma maneira viável de facilitar o suporte à simulação holística. No entanto, mesmo que os plug-ins garantam uma interoperabilidade CAD-BPS suave durante as fases iniciais do projeto, esses plug-ins podem não ser adequados para uma análise detalhada. Portanto, é desejável que os plug-ins façam uso de mecanismos de software detalhados ou formatos de troca comuns para evitar remodelação completa e resultados inconsistentes, quando o projeto evolui para etapas detalhadas (OSTERGARD *et al*, 2016).

3.5. LEGISLAÇÕES E NORMATIVAS

As legislações urbanísticas, coleções de leis, decretos e normas que regulam o uso e ocupação da terra urbana, são instrumentos fundamentais ao ordenamento social. A legalidade urbana organiza e classifica os territórios urbanos, atuando como um grande paradigma político-cultural (ROLNIK, 1999). Contudo, o que se observa nas cidades brasileiras é o acelerado crescimento urbano desordenado devido à inadequação das políticas públicas. Os planos diretores precedentes ao estatuto das cidades contribuem para tal problemática ao assumirem uma postura tecnocrática, tratando a cidade como um objeto puramente técnico e ignorando a função social da propriedade urbana (LAMBERTS *et al*, 2009).

A elaboração de legislação urbanística adequada, em todas as esferas administrativas, deve orientar não apenas a construção de espaços habitáveis, mas tentar antecipar os desafios das alterações naturais pelas quais as cidades em expansão estarão predestinadas..., estabelecendo alternativas mais sustentáveis para a resiliência urbana (TSUDA, 2019). O processo de urbanização pode acarretar modificações na atmosfera urbana causando impacto tais como ilhas de calor, poluição do ar e variações do regime de precipitações (LAMBERTS *et al*, 2009). De acordo com o segundo relatório de Mudanças Climáticas Urbanas – UCCRN (ARC 3.2 - 2018), a maior parte das respostas em relação às estratégias de governança tende a ser incremental e fragmentada, em direção a caminhos que não proporcionam transformações ao desenvolvimento urbano que possa alcançar a resiliência climática.

A construção de cidades adequadas aos usuários envolve o compromisso de todas as esferas do poder público, com a contribuição da academia, por meio de diretrizes legais mais alinhadas ao desempenho ambiental integrado que aborde estudos desde a implantação dos edifícios na escala urbana até à qualidade ambiental dos espaços internos (TSUDA, 2019; ARC 3.2, 2018).

No Brasil, esta integração legal avançou com o Estatuto das Cidades, lei federal 10.257 (2001) e com a Norma Brasileira de Edificações Habitacionais – Desempenho (ABNT-NBR 15575, 2013), no entanto ainda é bastante incipiente e em alguns aspectos inexistentes

(como a abordagem em relação às mudanças climáticas). Por ser um estado federativo, o Brasil apresenta uma hierarquia legislativa em que as leis federais restringem parte da autonomia legislativa dos governos locais (TSUDA, 2019).

O Estatuto das Cidades é o instrumento que regulamenta a política urbana e instaurou uma gestão democrática das cidades. Além do resgate da função social, o Estatuto introduziu a obrigatoriedade de estudos para redução do impacto ambiental para grandes empreendimentos imobiliários, a promoção de audiências públicas nos processos decisórios municipais e a necessidade de planos diretores com revisões periódicas (LAMBERTS *et al*, 2009; TSUDA, 2019). Entretanto, as questões referentes à qualidade ambiental são abarcada de forma simplificada e genérica, por meio de instrumentos urbanísticos que tratam as questões de forma implícita (LAMBERTS *et al*, 2009)

Ainda na esfera federal encontram-se as normativas que cabe à Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, membro fundador da ISO (International Organization for Standardization). As normativas devem estar em processo de melhoria contínua, acompanhando o desenvolvimento tecnológicos e metodológicos e os avanços científicos. No entanto, o que se observa é a morosidade de atualização das normativas, em especial das urbanísticas, representando um descompasso entre as futuras e atuais necessidades da sociedade e a regulamentação do conjunto de normativas vigentes. Ainda, obrigatoriedade de atendimento à normalização ocorre com a vinculação de norma técnica específica ou conjunto de normas na legislação (TSUDA, 2019).

No Brasil não há uma norma que aborde de forma holística o conforto ambiental ou questões relativas às mudanças climáticas, o mais próximo de uma avaliação multidisciplinar é a norma NBR 15575: 2013. Conforme descrito na própria normativa, seu objetivo de avaliação de desempenho “é verificar a adequação ao uso de sistema ou processo construtivo dentro da função a que foi destinado, independente da solução técnica aplicada” (ABNT-NBR 15575, 2013). Para Tsuda (2019), a controversa da norma está exatamente na adequabilidade ao uso, que não indica que seja o método mais adequado ou eficiente quanto a qualidade ambiental e não apresenta metas para eficiência do edifício ou emissão de gases poluentes na atmosfera.

Após quase 10 anos de vigência da NBR 15575: 2013, homologou-se em março de 2021 a atualização da parte referente ao desempenho térmico. A parte de iluminação natural e a normativa de térmica que dá suporte à parte de térmica, a NBR 15220:2005, estão em processo de revisão. Em relação à parte de iluminação natural, a norma NBR 15575:2013, apesar de considerar a simulação computacional como método de avaliação, baseia-se em critérios estáticos (iluminância no ponto), não apresentando critérios dinâmicos. As avaliações dinâmicas baseadas no clima consideram a ocorrência de um valor absoluto ou faixa de valores de iluminância durante o período de ocupação. A iluminância no

ponto não consegue avaliar a distribuição da luz natural no interior do ambiente e nem o impacto dela na eficiência energética. Segundo Pereira *et al* (2017), a referida normativa desconsidera os principais avanços realizados na área nos últimos 10 anos, somada a algumas inconsistências quanto aos valores recomendados para iluminâncias mínimas. Seguindo na direção da proposta da LM 83-12/2012 (ILUMINATING ENGINEERING SOCIETY, 2012), como fez a certificação LEED v.4 (GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL, 2014), sugere-se que a NBR 15575/2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) considere procedimentos de avaliação que estimem com maior precisão o comportamento da iluminação natural em ambientes internos (PEREIRA *et al*, 2017).

Em São Paulo, o decreto 57.776/2017 do código de obras estabelece a necessidade de comprovação do atendimento do desempenho da iluminação natural conforme exigido pela versão em vigência da norma NBR 15575 para homologação do projeto aprovativo na prefeitura, tornando-a obrigatória. Este decreto entende que os instrumentos de avaliação de insolação, aeração e iluminação contidos no código de obras são insuficientes para avaliação da iluminação natural na promoção do conforto e a adequada salubridade dos ambientes de permanência humana.

Quanto a versão de 2021 da parte de térmica, introduziu-se uma maior complexidade na avaliação do desempenho, pautada na simulação computacional. A mudança mais significativa concentra-se na metodologia de avaliação do desempenho, que ocorre de forma comparativa a partir de um modelo de referência por meio de avaliações anuais, inserindo indicadores de horas de conforto, carga térmica e temperatura operativa.

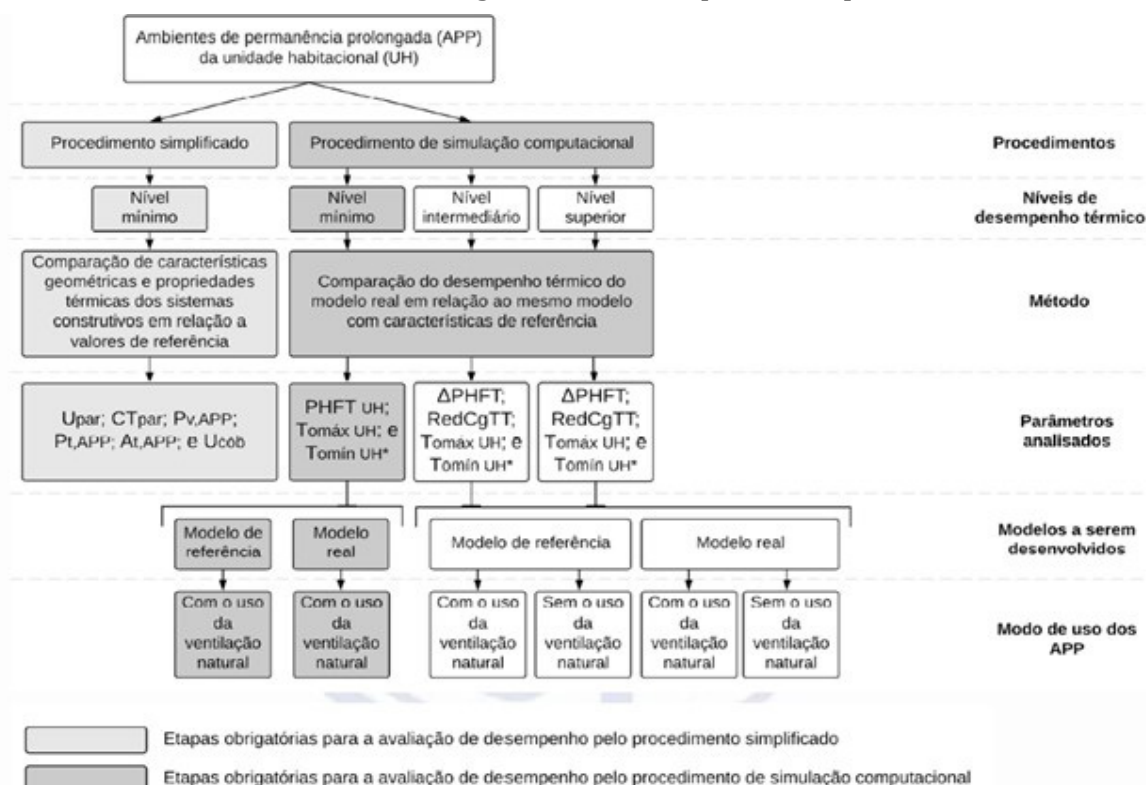


Figura 3.16 | Procedimento de avaliação do desempenho térmico - NBR 15575:2021 | Fonte: ABNT NBR 15575 (2021)

Contudo, não houve um aumento da exigência, que continua bem inferior aos padrões internacionais. Também não houve um nível mínimo de exigência de horas de conforto, independentemente do modelo de referência, como é exigido na ASHRAE-55 ou na EN-15251.

Outro fator importante é a obrigatoriedade de inserir carga interna devido à ocupação na modelagem, aspecto que era ignorado na versão anterior. O perfil de ocupação é definido pela normativa de acordo com o tipo de ambiente, sendo classificado em dormitório, salas e misto. A introdução do perfil misto de ocupação reflete a elevada representatividade da produção nacional de habitações compactas que são classificadas como misto por integrar dormitórios e salas em um único ambiente.

Em São Paulo, o Plano Diretor Estratégico - PDE (LEI nº 16.050/2014) em vigor desde 2014, a Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo – LPUOS (LEI nº 13.885/2016) de 2016 e o Código de obras e Edificações – COE (Lei nº 16.642/2017) especificam os parâmetros e mecanismos jurídicos e morfológicos de ordenamento territorial. O PDE visou um mecanismo para coibir e induzir determinadas formas urbanas e estimular o adensamento urbano, por meio da flexibilização da definição de áreas computáveis consideradas na aplicação dos coeficientes de aproveitamento. O estímulo da construção da verticalização de edifícios mistos introduziu o conceito de usos não residenciais que culminaram na explosão de unidades compactas, principalmente por meio da classe de NR1-12 (serviços de hospedagem ou moradia), conforme ilustrado nas figuras 3.17 e 3.18. Este fenômeno é evidenciado por dados da SECOVI, em que 27% dos projetos aprovados em 2021 é de uso misto (residencial e não residencial), dentre deles 41% são NR1-12. Além do aumento expressivo de apartamentos lançados com até 1 dormitório, representando 31% do total de 2021.

Unidades residenciais lançadas na cidade de São Paulo

Mil unidades

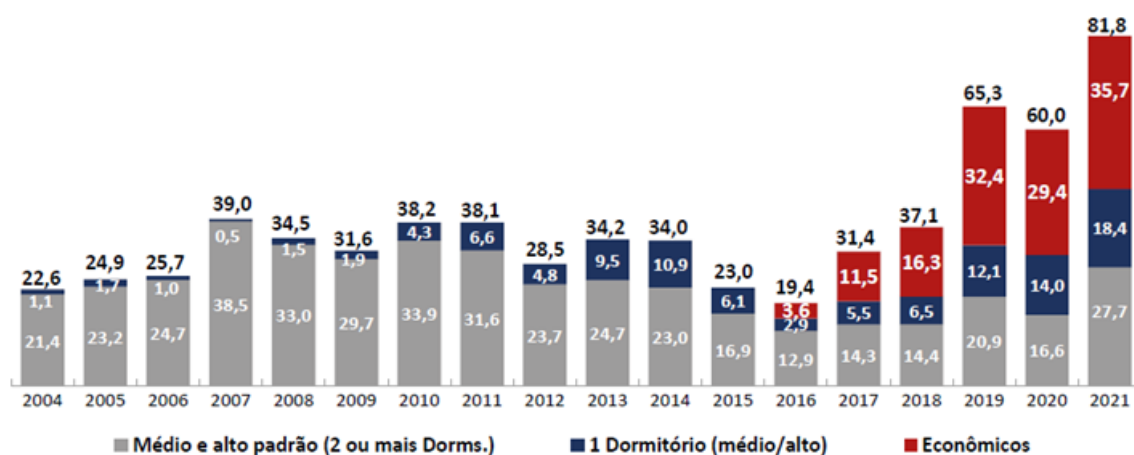


Figura 3.17 | Gráfico do total de unidades residenciais lançadas anualmente na cidade de São Paulo por tipo. Fonte: Anuário do mercado Imobiliário da SECOVI (2021)

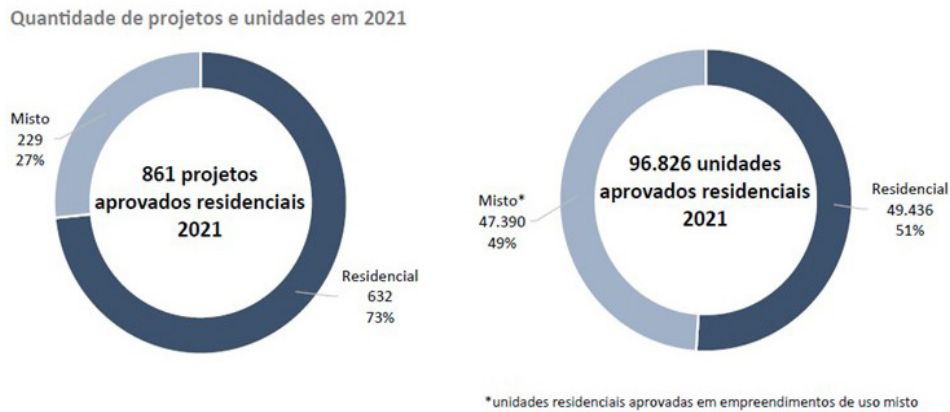


Figura 3.18 | Gráfico dos lançamentos em 2021 das unidades residenciais e não-residenciais. **Fonte:** Anuário do mercado Imobiliário da SECOVI (2021)

Ao serem classificadas como não residenciais, estas unidades podem não ser contempladas pela normativa NBR 15575, uma vez que está contempla apenas unidades habitacionais. Diante de tal panorama, a prefeitura, por meio da revisão preliminar do PDE, discute o desenvolvimento de instrumentos para frear a explosão de unidades compactas na cidade de São Paulo.

Outro ponto de influência direta na qualidade do ambiente interno é a inserção do empreendimento no lote. No PDE-2015 apesar do estímulo de passeios públicos mais largos e da fachada ativa no recuo frontal, os recuos laterais e de fundo ficam dispensados nas seguintes situações:

- I - quando a altura da edificação for menor ou igual a 10m em relação ao perfil natural do terreno.*
- II - quando o lote vizinho apresentar edificação encostada na divisa do lote.*
- III - em terrenos que tenham declividade com área igual ou menor a 250m² ou frente menor ou igual que 10m.*

Não há menções quanto à instrumentos que avaliem ou estudem o acesso ao sol e ao céu e o impacto da ventilação urbana na implantação dos edifícios. O PDE ainda é instrumentalizado a partir da lógica do lote, com diretrizes pouco abrangente em relação a dinâmica ambiental das quadras ou bairros.

Há outros instrumentos que auxiliam na promoção da qualidade ambiental, na eficiência energética e na redução das emissões de gases de efeito estufa, como o PROCEL EDIFICA, certificações ambientais (tais como LEED, referencial ACQUA, WELL) e programas de resiliência e desenvolvimento urbano, Race to Zero das Nações Unidas. Entretanto, estes são facultativos e não possuem poder legal, o que os tornam de ação limitada e localizada. Estes instrumentos criam força quando absorvidos por legislações, como é o caso da certificação BREEAM que utilizado como um dos instrumentos de avaliação pelo Plano Diretor de Londres, o London Plan (2021).

Por fim, mesmo em países cujas legislações urbanísticas são referências, como é o caso do Reino Unido e do Canadá, observa-se a influência dos padrões impostos pelo mercado imobiliário (TSUDA, 2019). As fórmulas aplicadas pelo mercado em que os riscos são menores e retornos financeiros maiores tendem a ser repetidos e incentivados, criando-se um padrão e, eventualmente concretizando-se como melhor alternativa ao consumidor (TSUDA, 2019). Em São Paulo, estas fórmulas são afirmadas pela propagação das varandas “gourmetizadas” e os contemporâneos microapartamentos.

O desafio de edificar-se cidades com mais conforto aos usuários e maior resiliência climática, passa pela integração multidisciplinar das diversas escalas do poder público, pautadas no talento e na criatividade de seus idealizadores, nos interesses financeiros de seus investidores e na condução das regulamentações e normativas (TSUDA, 2019; ARC 3.2, 2018).

Este capítulo apresenta os levantamentos de campo que têm como objetivo primário a obtenção de dados para os estudos de aderência das simulações computacionais. E como objetivo secundário verificar o desempenho térmico e luminoso da envoltória da recente (2011 - 2017) produção de microapartamentos paulistanos e seu impacto na promoção do conforto por meio de levantamentos de campo de cinco estudos de caso. Para tanto, os levantamentos foram realizados em quatro unidades sem ocupação, que permite um maior controle das variáveis medidas para aderência das simulações e uma unidade ocupada, que demonstrará o perfil de ocupação dessa tipologia.

Investigou-se o tema por meio de estudos de casos a partir de métodos indutivos experimentais. A metodologia aplicada foi conduzida em 5 etapas: etapa 1, delineamento da amostra dos estudos de casos; etapa 2, caracterização dos levantamentos de campo; etapa 3, tratamento de dados; etapa 4, análise térmica e luminosa; etapa 5 discussão dos resultados. Após o tratamento dos dados obtidos empiricamente foi possível gerar uma série de avaliações e análises que embasaram a discussão do conforto termo-luminoso com foco na relação espaço-usuário. As análises projetuais e dos dados primários obtidos nas medições terão como embasamento teórico os dados secundários levantados na revisão bibliográfica e nas normas e legislações vigentes explicitados ao longo de cada etapa.

4.1. ETAPA 1 | DELINEAMENTO DAS AMOSTRAS DOS ESTUDOS DE CASOS

Microapartamento é uma versão desenvolvida de estúdio que minimiza o espaço e maximiza a eficiência (Gabbe, 2015), porém na literatura acadêmica não há um consenso quanto a sua terminologia e definição, variando de tamanho e de nomenclatura de acordo com o país e a cidade. Portanto, o recorte de microapartamentos dessa pesquisa foi delineado a partir de referências internacionais, no levantamento da tipologia realizada por Leme e Monteiro (2016) e na categorização do Sindicato das Empresas de Compra, Venda e Administração de Imóveis (SECOVI, 2017). A SECOVI organiza os imóveis por área e por quantidade de dormitórios, sendo a menor faixa 45m² e 1 dormitório. No levantamento de Leme e Monteiro (2016) acerca da produção de microapartamentos entre 2011 e 2015 na cidade de São Paulo, a atual oferta de apartamentos compactos é caracterizada por habitações destinada à classe média e alta, com área entre 20 e 45m², planta livre e varanda, concentrada ao longo dos eixos de infraestrutura da capital paulistana.

Com base nas referências citadas, elencou-se cinco soluções arquitetônicas representativas de microapartamentos da atual produção paulistana como estudo de casos. As cinco unidades estudadas possuem aproximadamente 45m² de área total (contabilizando as varandas) e 20m² de área interna, planta livre, pé-direito aproximado de 2.7m. Estão distribuídas em três edifícios, sendo dois na zona sul e um na zona oeste da cidade de São Paulo. Cada unidade é um exemplar das tipologias de microapartamento mais comumente

ofertadas na cidade, sendo: (a) estúdio com fachada ventilada e brises na varanda; (b) estúdio com envidraçamento de varanda e habitada; (c) estúdio com varanda estendida descoberta; (d) duplex - unidade com dois pavimentos; (e) loft – unidade com pé-direito duplo (5.64m).

As soluções construtivas dos estudos de casos são bastante semelhantes, seguindo o padrão construtivo de mercado: laje de concreto armado, caixilharia de alumínio e vedação em bloco cerâmico. Somente a envoltória da unidade (a) que apresenta soluções com maior desempenho térmico, com fachada ventilada por meio de sombreamento de placas cerâmicas e camada de ar, além de brises na varanda. Quanto às aberturas, com exceção do duplex e do loft, os demais estudos de casos possuem apenas uma abertura caracterizada por portas de correr de vidro simples incolor, que são os acessos às varandas e não possuem elementos de sombreamento ou ventilação, como venezianas.

Buscou-se manter as mesmas unidades para todas as etapas de medições (verão e inverno), porém a unidade (a) teve uma variação de pavimento entre verão e inverno, foi possível manter a mesma orientação para ambos períodos. No inverno, os levantamentos das variáveis ocorreram na unidade da extremidade do 5º pavimento. No verão, conduziu-se a pesquisa na unidade do meio do 2º pavimento. A figura 4.1 apresenta o quadro resumo das características arquitetônicas de cada estudo de caso.

ESTUDO DE CASO CARACTERÍSTICAS									
Edifício	Unidade				Iluminação		Ventilação		Qtde
	Planta Interna	Andar	Orientação	P.D	Área	Envidraçada	Ventilação		
Unidade (a) F. Ventilada <i>(verão)</i>		2º	SUL		2,68m	22,3m²	8,9m²	5,1m²	Única
Unidade (a) F. Ventilada <i>(inverno)</i>		5º	SUL		2,68m	22,3m²	8,9m²	5,1m²	Única
Unidade (b) Habitada		16º	SE		2,43m	28m²	6,9m²	2,7m²	Única
Unidade (c) Estendida		2º	SO		2,70m	16m²	3,2m²	2,1m²	Única
Unidade (d) Duplex		14º	SO		2,70m	24,4m²	6,5m²	4,2m²	≠ Altura
Unidade (e) Loft		3º	SO		5,64m	22,1m²	8,6m²	3,9m²	Cruzada

Figura 4.1 | Quadro resumo das características arquitetônicas dos estudos de casos. | Fonte: autoral

4.2. ETAPA 2 | CARACTERIZAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS DE CAMPOS

Adotou-se a metodologia descritiva experimental para a elaboração dos levantamentos de campo. As medições foram realizadas de acordo com as orientações descritas na norma ISO 7726 (2001) para variáveis térmicas (temperatura de ar; temperatura de globo negro; velocidade de ar e umidade relativa) e as orientações da norma de Iluminação Natural ABNT 15215-2003 parte 4 - Método de medição para as variáveis luminosas (iluminância).

A norma ISO 7726 (2001) caracteriza os ambientes em que se realizarão as medições em duas classes, conforme à exigência de conforto térmico: tipo C (conforto) para ambientes moderados; tipo S para ambientes com estresse térmico. Os métodos de medições também devem levar em consideração a homogeneidade e a heterogeneidade das variáveis (MONTEIRO, 2008). De acordo com a classificação da referida normativa, os estudos de casos se enquadram como ambientes homogêneos tipo C e, portanto, seguiram as seguintes especificações quanto aos instrumentos e às condições ambientais e físicas.

Tabela 4.1 | Altura dos sensores para medição das variáveis ambientais (ISO 7726, 2001, adaptada pela autora)

Posição	Ambiente Homogêneo		Ambiente Heterogêneo		Alturas recomendadas	
	Tipo C	Tipo S	Tipo C	Tipo S	Sentado	Em pé
Cabeça			1	1	1,1 m	1,7 m
Abdômen	1	1	1	2	0,6 m	1,1 m
Calcanhar			1	1	0,1 m	0,1 m

Tabela 4.2 | Especificações dos Instrumentos para tipo C (conforto) - (ISO 7726, 2001/2001, adaptada pela autora)

Variáveis	Símbolo	Faixa de Medição	Precisão Requerida	Precisão Desejada
Temperatura do ar	t_{ar}	10 - 40 °C	$\pm 0,5$ °C	$\pm 0,2$ °C
Temperatura radiante	t_{rm}	10 - 40 °C	± 2 °C	$\pm 0,2$ °C
Velocidade do ar	v_{ar}	0,05 - 1 m/s	$\pm [0,05 - 0,05V]$	$\pm [0,02 - 0,07V]$
Umidade absoluta	P_{ar}	0,5 - 3,0 kPa	$\pm 0,15$ kPa ($ t_{ar} - t_{rm} < 10^{\circ}C$)*	

* Representação matemática apresentada por Monteiro (2008) para a recomendação descrita na norma ISO 7726 (2001)

Quanto às variáveis ambientais coletadas, a norma ISO 7726:2001 define e estabelece que:

a. *Temperatura de ar*: é a temperatura ao redor do corpo humano (4.1.1; ISO 7726; 2001). No entanto, os efeitos da radiação no sensor (especificações na tabela 4.2.4)

utilizado podem gerar discrepâncias entre a temperatura do meio e a temperatura de ar medida. Como os estudos de casos são ambientes internos, tomou-se como precaução posicionar os sensores (especificações técnicas na tabela 4.4) em locais que não tenham a incidência de radiação direta e nem muito próximos às superfícies das vedações, seguindo recomendações da própria normativa.

b. Temperatura radiante média: é a temperatura de um espaço imaginário uniforme em que as trocas de calor por radiação do corpo humano são iguais às trocas por radiação num ambiente não uniforme (tabela 4.1.2; ISO 7726;2001). Esta é mensurada por meio da temperatura de ar, da velocidade do ar e da temperatura de globo. Assim, a variável coletada foi a temperatura de globo negro com dados obtidos a partir do termômetro, no caso, de mercúrio instalado no interior do globo negro (especificações técnicas na tabela 4.4). É importante ressaltar que os dados obtidos do globo negro são aproximações com as respostas do corpo humano.

c. Velocidade do ar: A velocidade do ar é de difícil mensuração devido à aleatoriedade de seu fluxo. Por serem ambientes internos com poucas aberturas, a coleta da direção do fluxo pode ser desconsiderada. Foram utilizados como instrumentos para aferir a velocidade do ar anemômetros de fio quente (especificações técnicas na tabela 4.4).

d. Umidade absoluta: é caracterizada pela quantidade real de vapor de água contido no ar de um determinado meio. No levantamento de campo em questão foram utilizados sensores que mensuram a umidade relativa, sendo necessário assim o cálculo da umidade absoluta. Esta pode ser determinada a partir da seguinte expressão:

$$pv = 6,11 * 10^{-3} * UR * \exp[17,27 * Tar / (Tar + -273,3)]$$

onde: pv = pressão parcial de vapor, em kPa; Tar = Temperatura de ar, em °C

UR = umidade relativa, em %

Em relação às variáveis luminosas, a norma de *Iluminação Natural ABNT 15215-2003 parte 4 de Método de Medição* orienta que o sensor (especificações técnicas na tabela 4.4) deve estar corrigido para apresentar uma sensibilidade espectral próxima à curva de sensibilidade do olho humano. Na insuficiência de equipamentos de medição, instalar os equipamentos no centro do ambiente. Tal norma recomenda a altura do sensor a 0.75m do piso, porém o sensor de iluminância estava instalado junto com o de térmica e, portanto, sua altura final foi de 1.05m do piso.

A variável luminosa mensurada foi a iluminância, que é realizada com o auxílio de fotômetros denominados luxímetros, que resultam de um sensor fotométrico. A iluminância é a luz que chega (incidente) numa determinada superfície ou plano de trabalho, ou seja, luz incidente não visível.

4.2.1. DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS

Os levantamentos de campos foram conduzidos em três fases: 1. Teste, com o intuito de validação e aprimoramento dos procedimentos para a medição; 2. Inverno; 3. Verão. A fase de teste ocorreu durante 10 dias e apenas na unidade (c), as demais fases foram realizadas durante 20 dias cada, em períodos típicos de inverno e verão de acordo com as condições climáticas previstas pelo INMET, intercalando momentos com a esquadria aberta e fechada. A opção de variação do estado da esquadria permitiu a compreensão do comportamento das edificações em relação a entrada de ar, coletando dados em situações com e sem ventilação natural. Aliado a isso, tais dados auxiliaram na aderência das simulações, pois possibilitaram o balizamento dos parâmetros de fenestração e infiltração.

Tabela 4.3 | Caracterização dos períodos de medições

Etapa	Duração	Período	Temperatura de ar externa*		
			Média**	Máxima	Mínima
TESTE (2017)	10 dias	2-12 julho	15.3°C	24.4°C	8.7°C
INVERNO (2017)	20 dias	12-31 agosto	17.3°C	30.8°C	11.2°C
Caixilho aberto***	10 dias	22-31 agosto			
VERÃO (2018)	21 dias	6-26 março	23.8°C	32.5°C	19.3°C
Caixilho aberto***	10 dias	23-31 agosto			

* Temperatura de ar externa, dados referentes à estação do INMET, Mirante de Santana em São Paulo.

** Média da temperatura de ar externa calculada referente ao período de medição.

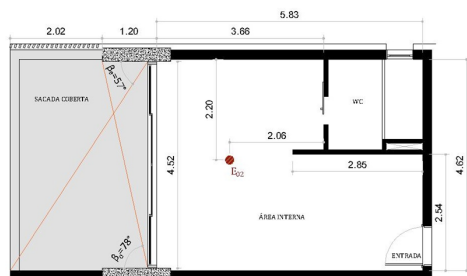
*** As unidades (a) e (b) tiveram momentos diferentes de abertura de caixilho. A unidade (a) no inverno manteve a porta aberta entre os dias 12 e 18 de agosto. A unidade (b), como é a única ocupada o manuseio da esquadria ficou de acordo com a preferência do usuário.

Tabela 4.4 | Especificações dos Instrumentos utilizados nas medições

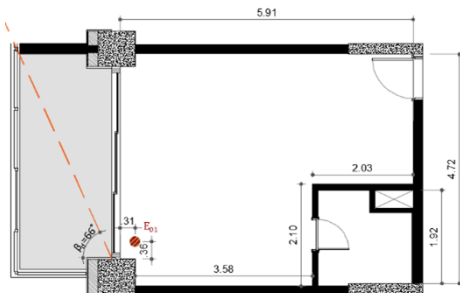
Equipamento	Marca Modelo	Descrição	Faixa de Medição	Precisão
Sensor de Temperatura de ar (T_{ar})	HOBOWare U12013	HOBO U12 Temp/RH/ 2 External Data Logger	-20°C a 70°C	$\pm 0,35^\circ\text{C}$ entre 0°e 50°C
Sensor de fio quente - Velocidade do ar (v_{ar})	AccuSense F900 Air sensor	AccuSense F900 Air Velocity and Air Temperature Sensor	0,015m/s a 10m/s	$\pm 0,05$ m/s entre 15 e 35°C
Globo negro	n/d	Esfera em cobre de \varnothing 10cm com pintura externa fosca preta	-	-
Sensor de Temperatura do globo negro	HOBOWare TMCxHD	TMCxHD Water/ Soil Temperature sensor	-40°C a 100°C no ar	$\pm 0,25^\circ\text{C}$ entre 0°e 50°C /
Sensor de Umidade Relativa (UR)	HOBOWare U12013	HOBO U12 Temp/RH/ 2 External Data Logger	5% a 95% UR	$\pm 2,5\%$ entre 10% e 90% UR
Sensor de Iluminância	HOBOWare U12012	HOBO U12 Temp/RH/ Light/External Data Logger	1 a 4500 LUX	$\pm 2,5\%$

Em cada unidade de estudo de caso foi disposto um tripé composto por um globo negro, que contém em seu interior sensor HOBOWare TMCxHD, um sensor de fio quente modelo AccuSense F900 e um datalogger (HOBOWare -U12) para coleta e registro de dados primários de variáveis térmicas (temperatura do ar, velocidade do ar, umidade relativa e temperatura de globo) e luminosas (iluminância). Os sensores foram locados 1.05m de altura no centro das unidades, orientados para as aberturas e com registros de dados a cada 15min. A tabela 4.4 compila as especificações técnica dos equipamentos utilizados para melhor compreensão dos resultados obtidos.

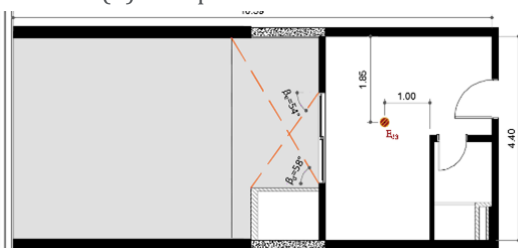
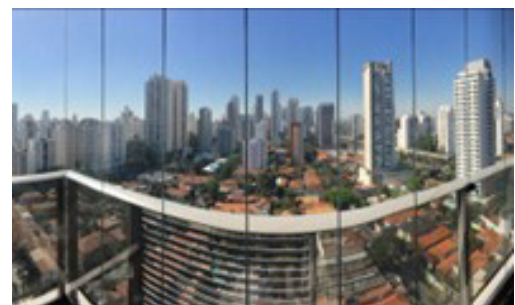
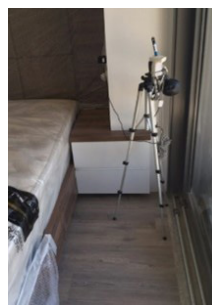
A unidade (b) é a única habitada e mobiliada, para a execução do levantamento optou-se por dispor o tripé em local com menor interferência possível no cotidiano dos usuários, mas que permitisse a avaliação da iluminação e térmica. O tripé foi instalado à 1,05 metros de altura, em frente a porta. Também se optou por não determinar um período de abertura e fechamento das esquadrias, avaliando o desempenho da unidade considerando apenas o comportamento natural dos usuários quanto ao controle das aberturas. Por fim, é a única com envidraçamento de varanda, modificação frequente nessa tipologia de habitação. Contudo, a porta original entre a varanda e o interior foi mantida, sendo esta a única abertura destinada à ventilação e iluminação natural do apartamento. A seguir as figuras 4.2 ilustram os equipamentos utilizados e o posicionamento de cada conjunto no interior dos estudos de casos.



Unidade (a) - tratamento de fachada

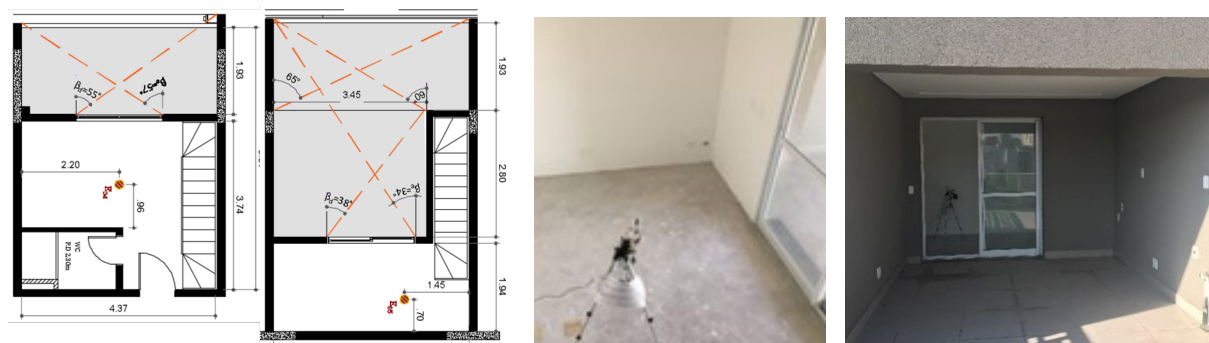


Unidade (b) - ocupada



Unidade (c) - varanda estendida





Unidade (d) - duplex



Unidade (e) - loft (pé-direito duplo)

Figura 4.2 | Planta e fotos da medição nas unidades | Fonte: autoral

4.3. ETAPA 3 | TRATAMENTO DE DADOS

Por tratar-se de espaços residenciais, optou-se pelo modelo adaptativo como índice de conforto térmico, visto que este considera ambientes naturalmente ventilados e o usuário como agente ativo na formatação do conforto. Para o tratamento dos dados primários adotou-se parâmetros e critérios de avaliação para validação dos resultados, sendo estes:

- a. Dados climáticos externos: adotou-se como fonte de dados climáticos do ambiente externo a estação automática do mirante de Santana em São Paulo –SP.
- b. Discrepâncias nos dados coletados: Os dados foram coletados a cada 15 minutos, quando a discrepância de valores entre os intervalos era superior a 2°C, substituíam-se aqueles pela média dos valores adjacentes. Em menos de 1% da amostra identificaram-se discrepâncias acima de quatro intervalos de tempo consecutivos. Em tais situações, os valores eram desconsiderados para os cálculos das variáveis secundárias e dos índices de conforto.
- c. Comportamento do usuário: em relação às vestimentas, a norma ISO 9920 (2009) considera o valor de 0,3 clo, ou 0,05 m²KW-1 de isolamento para vestimentas leves (calças, shorts, camisetas, chinelos, meias), o que é mais coerente a esses ambientes e contexto climático. Ainda segundo recomendações de tal normativa, foi adotado a baixa taxa metabólica que equivale a 1 met (58Wm-2) considerando indivíduos em atividade sedentária (sentado ou em pé parado).

d. Intervalo de dados utilizados para avaliações: Como os dados primários medidos foram registrados a cada 15 minutos, e os dados da estação automática a cada hora, foi estipulada a média simples dos intervalos que compunham cada hora dos registros medidos. Tal média foi utilizada para cálculo das variáveis secundárias e dos índices adotados.

e. Tratamento estatístico dos dados: se deu por meio do desvio padrão e para representação dos dados, o intervalo de confiança de 90%. Este é um intervalo numérico (de um parâmetro populacional, no caso o desvio-padrão), associado a uma probabilidade (o nível de confiança), que representa a confiança de que o intervalo contém o parâmetro, sendo calculado a partir de:

$$\text{Intervalo (inferior/ superior)} = \bar{x} \pm z \cdot \sigma / (\sqrt{n})$$

onde: n = amostra σ = desvio padrão da amostra \bar{x} = média da amostra

z = ponto z de 1.645; equivalente para intervalo de 90%

f. Variáveis calculadas secundárias: Além das variáveis primárias proveniente das medições e da estação automática, também foi necessário o uso de variáveis calculadas secundárias para composição das análises, sendo estas:

i. Temperatura média radiante é calculada a partir da temperatura de ar, temperatura de globo e velocidade do ar e segundo Nicol, Humphreys e Roaf (2012), expressa por

$$Trm = [(Tg+273)^4 + (1,2 \cdot 10^8 \cdot d \cdot 0,4) Var 0,6(Tg-Tar)] 0,25 \cdot 273$$

onde: Trm = Temperatura radiante (°C) Tg = Temperatura de globo (°C)

Tar = Temperatura de ar (°C) Var = Velocidade do ar (m/s) d = Diâmetro do globo (m)

ii. Temperatura operativa (To), índice que combina a temperatura de ar e a temperatura radiante média em um valor único, expressando o efeito casado delas (Nicol, Humphreys e Roaf; 2012). A avaliação do conforto na abordagem adaptativa será expressa em função da temperatura operativa estabelecida pela ASHRAE 55 (2013), considerando taxa metabólica de 1 met. Como em alguns momentos houve variação da velocidade do ar superior à 0.1 m/s, optou-se por utilizar o cálculo do CIBSE (2006) para temperatura operativa que considera tal variação na expressão da To .

$$To = [Ta \cdot \sqrt{(10 Var)} + Trm] / [1 + \sqrt{(10 Var)}]$$

Trm = Temperatura radiante (°C); Tar = Temperatura de ar (°C);

Var = Velocidade do ar (m/s); To = Temperatura operativa (°C);

iii. Iluminância externa (E) dos dados obtidos junto ao INMET, em relação à quantidade de luz disponível, referem-se à radiação solar sendo necessário transformá-los em iluminância. Conforme Alucci (2001) e pesquisas do IPT (relatório 13.257 – 1980)

indicam a seguinte correlação entre a radiação solar e o nível de iluminância:

$$E = (94 \times R) \text{ W/m}^2$$

sendo: R = radiação solar incidente (W/m^2); E = Iluminância (lux)

g. Índices de conforto adotados: adotou-se o modelo adaptativo como índice de conforto térmico e o UDI – índice de iluminâncias úteis da luz natural para conforto luminoso.

i. Modelo adaptativo considera ambientes naturalmente ventilados, nos quais as condições térmicas dos espaços são reguladas principalmente pelos ocupantes (ASHRAE 55, 2013). Apresentará faixas de aceitabilidade (80% e 90%) em relação ao conforto térmico do usuário correlacionando as temperaturas operativas mensuradas e a média mensal da temperatura do ar externo, representada pela equação:

$$T_{\text{accept}} = 0.31T_o + 17.8 \pm T_{\text{lim}}$$

onde: T_o = Temperatura Operativa ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{accept} = Temperatura de aceitabilidade ($^{\circ}\text{C}$),
 temperatura limite das zonas aceitáveis.
 T_{lim} = Temperatura limite ($^{\circ}\text{C}$), sendo a faixa
 temperaturas aceitáveis dado por: $T_{\text{lim}}(80) = 3.5\text{K}$ e $T_{\text{lim}}(90) = 2.5\text{K}$

ii. Iluminâncias úteis da Luz Natural (UDI) considera valores úteis de iluminância e qual a porcentagem de ocorrência destes durante o ano. As faixas de iluminâncias úteis utilizadas para avaliação do conforto luminoso foi entre 300 e 3000lux, que é considerada como desejáveis ou pelo menos toleráveis pelos ocupantes (Mardaljevic et al, 2012). Ainda, o UDI é subdividido em duas categorias: suplementar e autônoma. Na suplementar, entende-se que quando a avaliação da iluminância natural está entre 100 e 300lux, dependendo da tarefa a ser executada há necessidade de complementação com a iluminação artificial. Inferior a 100lux é considerada não útil, superior à 3000 lux excessiva e entre 300 e 3000lux autônoma.

Ressalta-se que as pesquisas acerca da determinação da faixa de UDI são referentes à espaços não residenciais, e que se observam incertezas entre os limites preferidos ou tolerados para edifícios comerciais e para os residenciais (Mardaljevic et al, 2012). Os autores reforçam que as escalas apresentadas devem ser tomadas como ilustrativas e sujeitas a revisão posterior, em vez de conservá-la à perpetuidade.

4.4. ETAPA 4 | ANÁLISES TÉRMICA E LUMINOSA

As análises foram realizadas a partir da correlação de duas abordagens: projetual e ambiental. A primeira, ao compreender as análises imperativas do projeto na formação do conforto, irá debruçar-se sobre as soluções arquitetônicas e construtivas adotadas em relação ao conforto termo-luminoso. A segunda concentra-se na análise do desempenho termo-luminoso a partir das variáveis ambientais por meio de índices de conforto e de métricas dinâmicas da iluminação natural.

4.4.1. ABORDAGEM PROJETUAL

As análises projetuais estão organizadas em dois blocos: implantação e formação do espaço interno. Quanto à implantação, as cinco unidades levantadas estão distribuídas em três edifícios, sendo dois na zona sul e um na zona oeste. O edifício 1 contém a unidade (a), localizada no décimo sexto andar da fachada sudeste. O edifício 2, a unidade (b), no décimo sexto andar da fachada sul. Por último o edifício 3, no qual todas as três unidades se encontram na fachada sudoeste, sendo a unidade (c) no segundo andar, a (d) no décimo quinto e a (e) no terceiro.

As máscaras na figura 4.3 representam o grau de obstrução do entorno imediato nos edifícios estudados. Apesar dos entornos existentes não apresentarem grandes obstruções, as imagens aéreas indicam a tendência de profundas alterações de adensamento e de verticalização. Além disso, a figura 4.3 também demonstra o condicionamento da implantação e do desenho do edifício ao formato e dimensões do lote.

EDIFÍCIO 1



EDIFÍCIO 2



EDIFÍCIO 3



Figura 4.3 | Composição de análises do entorno dos edifícios dos estudos de casos. Planta do pavimento tipo, imagem da fachada, imagem aérea do Google maps 2018, máscara do entorno produzida pela autora baseadas em arquivo da malha urbana de São Paulo obtido no CESAD. | Fonte: autoral

A máscara do edifício 1 apresenta a maior parcela de céu visível, porém seu entorno imediato indica significativas mudanças de uso e ocupação do solo, principalmente em relação à verticalização. O entorno imediato do edifício 2 (zona sul) é predominantemente residencial de baixo gabarito, adjacente ao atual eixo de expansão do centro financeiro da cidade, o que tem impulsionado a construção de edifícios altos e mistos. No entanto, tal edifício faz parte de um complexo de 3 torres e seu mascaramento demonstra que a maior parte da obstrução aferida é proveniente das torres do seu próprio empreendimento. Como as unidades estão distribuídas em duas fachadas, no eixo noroeste-sudeste, tal obstrução se torna bastante impactante. Ao invés de minimizar os efeitos da mudança do entorno, as unidades na fachada orientada para o interior do complexo apresentam forte obstrução das torres adjacente do empreendimento. A fachada orientada às edificações externas ao empreendimento, apesar de apresentar pouca obstrução, está mais suscetível às alterações de adensamento e verticalização presentes na região.

O edifício 3 é o que possui entorno misto de baixo gabarito, com processo de verticalização e adensamento menos intenso. Ainda, o edifício 3 está localizado em região de relevo e por estar em cota mais elevada que a vizinhança imediata tem os efeitos de obstrução atenuados. Por ter sido uma região industrial, observa-se ainda a presença de grandes terrenos e diversos galpões, permitindo maior acesso à céu e ao sol.

São edifícios com muitas unidades por pavimento, quase que exclusivamente de microapartamentos. A maioria expressiva das unidades são composta apenas por uma única abertura, que é responsável pela ventilação e iluminação, intensificando os impactos da implantação e da obstrução das torres na formação do conforto. Nos 3 empreendimentos estudados observa-se o condicionamento do desenho do edifício aos coeficientes construtivos e à geometria do lote, sendo o conforto e habitabilidade das unidades resultantes dessas premissas.

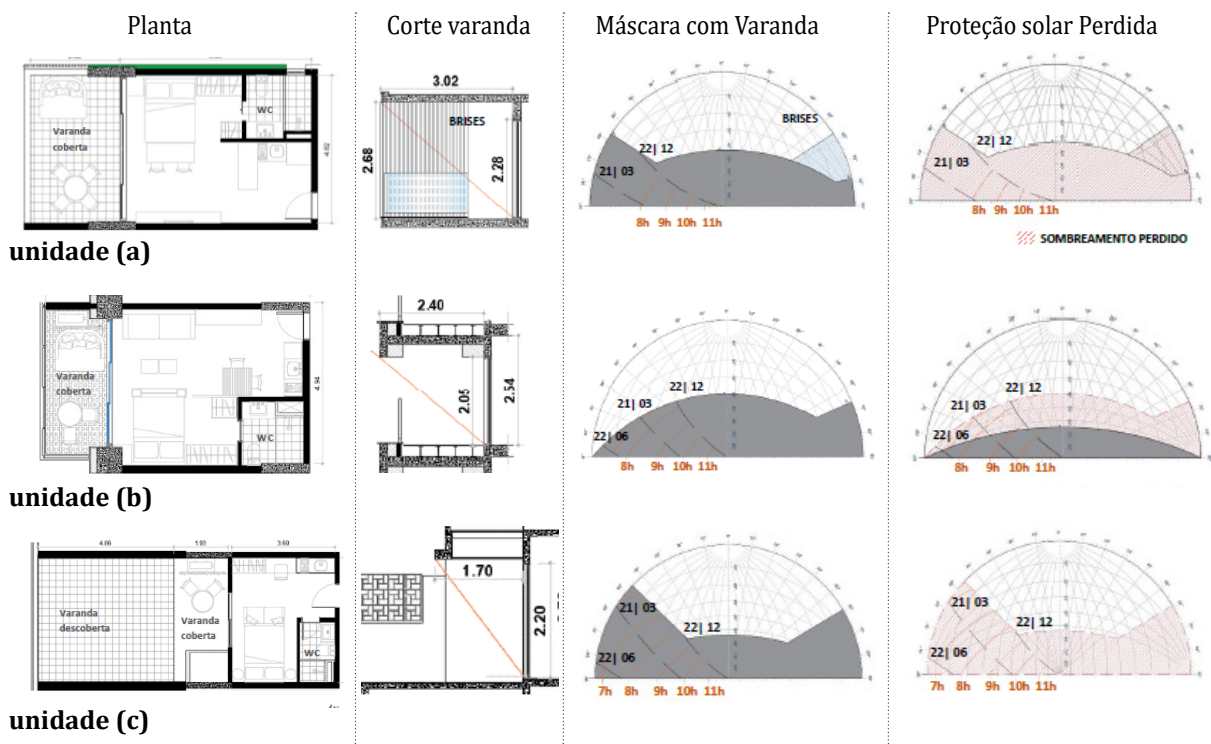
Quanto à formatação do espaço interno, os cinco estudos de casos elencados são exemplares representativos da diversidade de soluções de microapartamentos ofertadas entre 2014 e 2018. Observa-se a padronização dos projetos, independentemente da área, das

especificidades de cada empreendimento e da orientação. Todas apresentaram soluções de espaço e propostas de ocupação muito semelhantes, incentivando a integração da varanda com o espaço interno por meio do envidraçamento de varanda¹ e supressão da esquadria original.

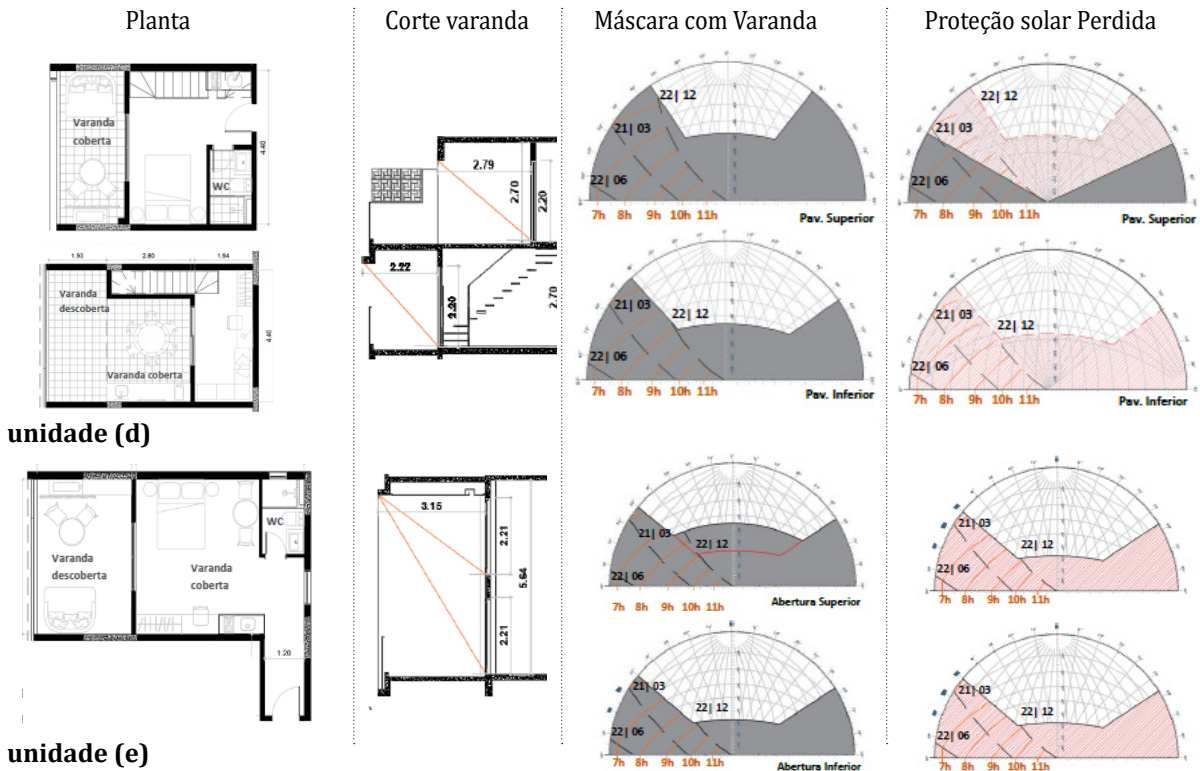
A varanda em todos os estudos de casos representa expressiva parcela da área útil. Os espaços de transição como varandas e terraços são estratégia bastante interessante na formatação do conforto em locais com clima subtropical, até mesmo em espaços compactos como os estudados. De acordo com Gonçalves (2015), o sombreamento adequado é uma das estratégias passivas mais importantes para o bom desempenho dos edifícios nas zonas climáticas brasileiras.

No entanto, ao incentivar a ampliação do espaço interno por meio da integração da varanda, esta deixa de exercer a função de espaço de transição. Logo, a proteção à radiação direta e às intempéries proveniente do espaço de transição é reduzida e em muitos casos suprimida, conforme ilustrado na tabela 4.5. Tal situação resulta de regras do Código de Obras de São Paulo (1992) que caracterizam varandas e terraços como área não computável sendo utilizado pelo mercado como instrumentos para aumento do potencial construtivo. As máscaras das aberturas apresentadas na tabela 4.5 ilustram os prejuízos de proteção solar que a incorporação da varanda pode ocasionar.

Tabela 4.5 | Estudos das máscaras de sombreamento das aberturas



1 O envidraçamento de varanda se caracteriza por painéis móveis de vidro incolor, do piso ao teto, fixados juntos ao peitoril. Como não podem interferir na fachada para que se mantenha a uniformidade da mesma, estes acabam por facilitar a exposição à radiação direta e limitar os controles de ventilação e iluminação.



Assim como o sombreamento, as aberturas também são componentes fundamentais ao desempenho do edifício relacionadas principalmente às estratégias de ventilação natural e massa térmica. Por tratarem-se de espaços compactos, onde um único ambiente é responsável por desenvolver diferentes atividades, as aberturas acumulam diversas funções e, portanto, há a necessidade de maior diversidade das soluções aplicadas a estas. Na totalidade das unidades analisadas a esquadria entre a varanda e o interior, se não é a única, é a principal responsável pela renovação do ar e pela penetração da luz natural, além de funcionar como o único elemento de acesso ao ambiente externo.

Como são empreendimentos com muitos apartamentos por andar, a possibilidade de diversas aberturas em diferentes fachadas é limitada. Contudo, não há diferenciação de soluções arquitetônicas e construtivas de acordo com a orientação e o efeito do entorno imediato, cujas porcentagens de área de vidro em relação à fachada são extremamente elevadas, no mínimo 70%. Além disso, apenas as unidades (a) e (b) apresentam mais do que 2 folhas operáveis, possibilitando uma maior variação de arranjos de aberturas e maior área de ventilação.

Nos estudos de casos, todas as aberturas eram compostas por panos de vidros incolor, fixos ou de correr, sem venezianas ou elementos de sombreamento incorporado e muitas vezes de baixa qualidade construtiva, permitindo uma elevada taxa de infiltração de ar e ruído. Nos edifícios 1 e 2, as esquadrias eram de caixilhos de ferro e pré-fabricadas, apresentando menor infiltração e melhor vedação. No edifício 1, não é permitido a supressão da porta da varanda e por estar localizado em região sob rotas aéreas, as esquadrias possuem

vidros duplos e isolamento acústico com vedações de borrachas nos encaixes entre as folhas o que elevaram seu desempenho térmico. No edifício 3, as esquadrias são de alumínio montadas no canteiro de obra, com vidro de 4mm, o que as tornaram mais frágeis e com menor poder de vedação, permitindo maior a infiltração de ar, água e partículas sólidas.

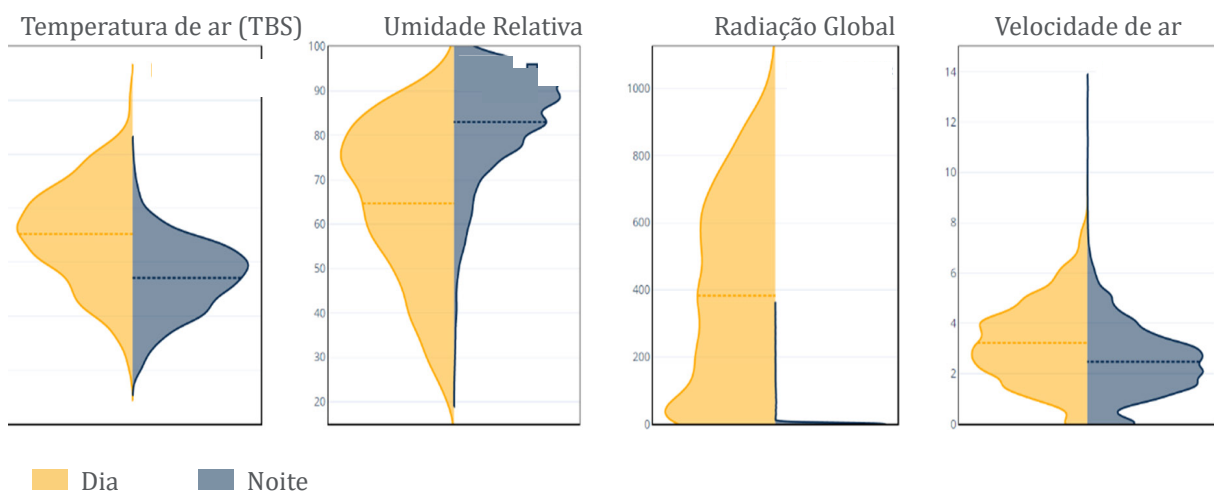
Quanto a quantidade e a distribuição das aberturas nos estudos de casos, apenas unidades localizadas nas extremidades dos edifícios possuem mais de uma abertura (unidades (a) e (e)). A unidade (b) está localizada na extremidade do edifício, mas continuou com apenas uma única abertura. Entretanto, apenas a unidade (e) tem aberturas em lados e alturas opostas, possibilitando a ocorrência de ventilação cruzada. Nos demais, quando há duas esquadrias, estas estão na varanda e no banheiro, não permitindo a adequada ventilação cruzada.

4.4.2. ABORDAGEM AMBIENTAL | TÉRMICA

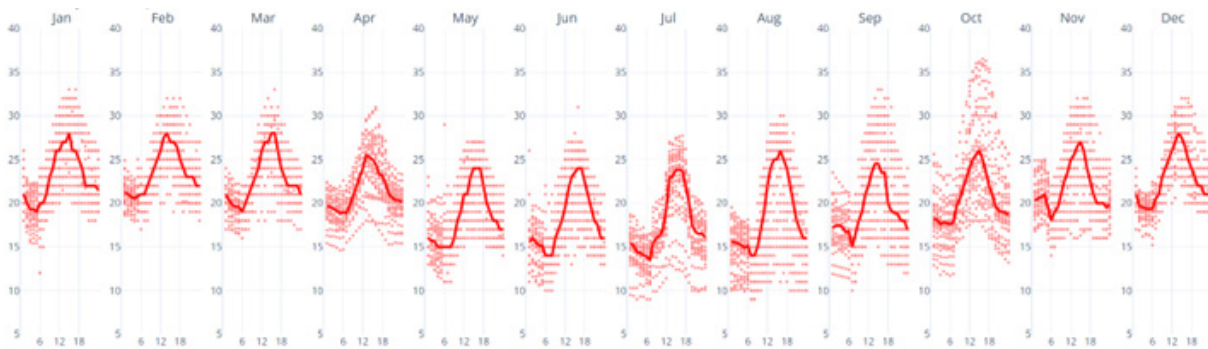
Em edifícios residenciais a taxa de ocupação é predominantemente noturna e, portanto, as estratégias a serem adotadas na formatação do conforto devem priorizar tal período de permanência, principalmente durante o sono. Não obstante, nos microapartamentos, a complexidade em propiciar as condições de conforto e em manter a qualidade ambiental é amplificada devido à sobreposição de funções em um único espaço compacto. Dessa forma, à avaliação do conforto em sua totalidade deve considerar tais dinâmicas e a interação entre as diversas esferas do conforto ambiental, em especial o térmico e o luminoso.

Em climas subtropicais, como o da cidade de São Paulo, as condições ambientais amenas favorecem o uso de estratégias passivas para o alcance do conforto do usuário, em especial de sombreamento, de ventilação e de massa térmica (Gonçalves, 2015). O clima de São Paulo é classificado no sistema Köppen–Geiger como subtropical úmido, sem período de seca, com temperatura média anual de 20.6°C, máxima anual (99%) de 31°C e mínima de (1%) de 11°C.

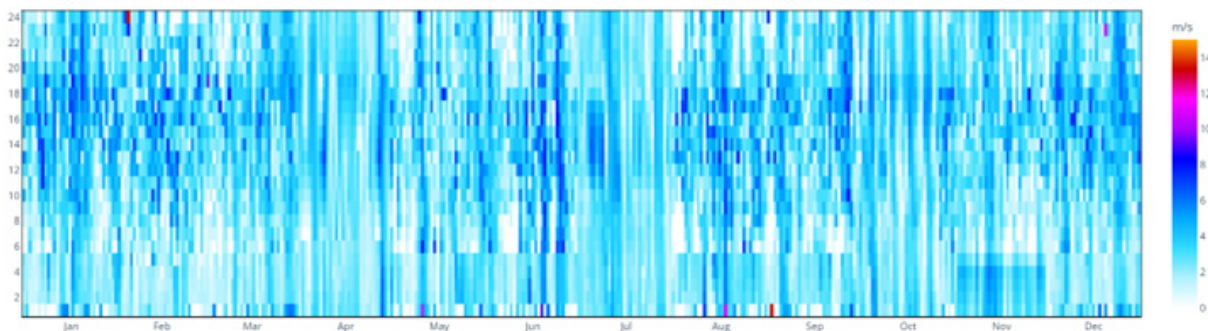
Gráfico 4.1 | Perfil climático da cidade de São Paulo | Fonte autoral elaborada no website CBE



Perfil da Temperatura de ar externa (TBS) diária por mês



Velocidade de ar horária no ano



A variação diária da temperatura externa da cidade de São Paulo, ilustrada no Perfil de Temperatura de ar externa (TBS) diária por mês, colabora ao uso de massa térmica, uma vez que apresenta temperaturas noturnas ao longo do ano amenas, entre 20°C e 15°C, e diurnas flutuando entre 28°C e 20°C. A massa térmica desempenha papel fundamental na formação do conforto em espaços residenciais, uma vez que contribui para a retenção do calor diurno durante as noites frias, condição frequente no clima de São Paulo (GONÇALVES, 2015). Nos microapartamentos o efeito da massa tende a ser amplificado devido ao pequeno volume de ar em relação à área total da envoltória. A redução da área interna e o pé-direito relativamente baixo, com exceção da unidade (e), acentuam a contribuição da envoltória e das vedações na formação do conforto.

É possível verificar tal efeito nos gráficos 4.2 e 4.3 por meio da amplitude térmica das temperaturas internas que é consideravelmente menor do que a amplitude das temperaturas de ar externas. Os gráficos apresentaram as máximas e mínimas de cada unidade, além da distribuição das temperaturas coletadas considerando um intervalo de confiança de 90% (representadas pelas barras horizontais cinzas). As amplitudes internas observadas concentram-se na faixa entre 25°C e 27°C no verão, e 20°C no inverno e indicam a escala de variação das temperaturas. As máximas e mínimas também apresentaram valores menos extremos, cerca de 1,5°C menor que a máxima externa no verão, atingindo uma diferença de 4°C no inverno, e mínimas maiores, em torno de 3°C. Diversos fatores contribuíram para tal quadro, mas possivelmente a massa térmica e as áreas envidraçadas sejam os elementos que tenham maior relevância.

Gráfico 4.2 | Intervalo das Temperaturas de ar externa e internas

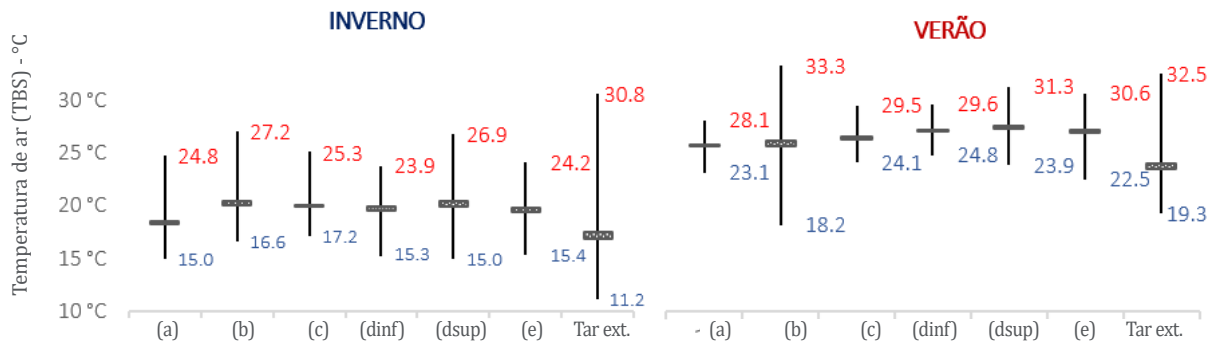
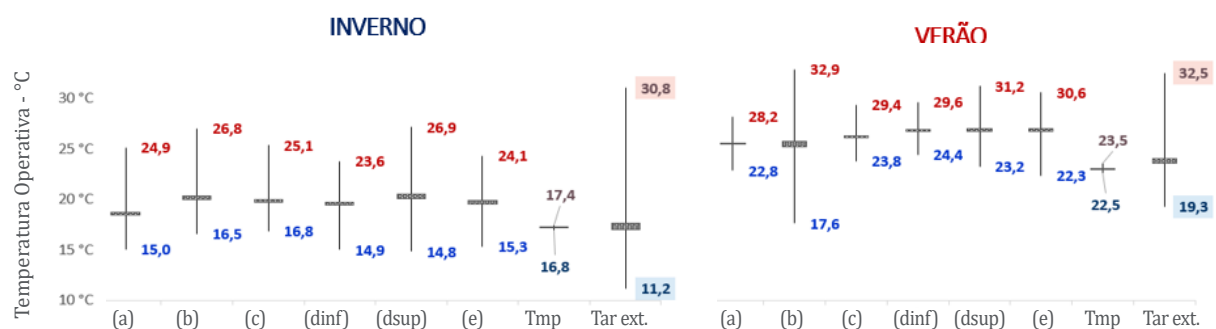


Gráfico 4.3 | Intervalo das Temperaturas Operativas e Tar externa



Contudo, os levantamentos foram realizados em unidades vazias e, portanto, não contabilizando assim a influência da carga térmica na elevação da temperatura interna, com exceção da unidade (b). Nesse sentido, o que se observa é uma baixa inércia térmica do ambiente afirmada pelas elevadas temperaturas operativas internas indicando o impacto tanto da alta porcentagem de vidro na fachada, como do baixo desempenho térmico das vedações.

A unidade (a) possui a menor variação dos valores extremos e o maior achatamento da distribuição das temperaturas internas, provavelmente devido ao uso de materiais com melhor desempenho na vedação em conjunto ao tratamento térmico da fachada (brises e sombreamento de fachada) e ao isolamento acústico das esquadrias (vidro insulado e melhor vedação do caixilho). Além disso, foi a unidade em que as distribuições de temperaturas se concentraram na menor faixa de temperatura, 25°C no verão e 19°C no inverno. Ainda, os resultados da unidade (d) que está localizada na cobertura e, portanto, possui maior exposição à radiação solar, acentuam a baixa qualidade de desempenho térmico da envoltória. Tal unidade, no pavimento superior, apresenta as maiores temperaturas internas, com comportamento térmico muito próximo ao das condições externas, ou seja, não há grandes atrasos térmicos.

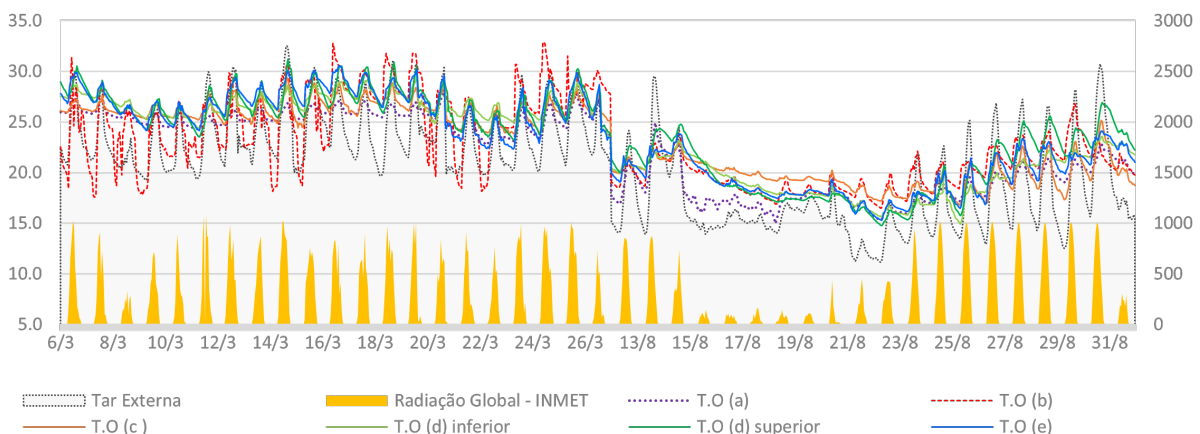
Outro fator que influenciou os resultados obtidos foi a porcentagem de área de vidro. As elevadas áreas de vidro das unidades estudadas reduziram o efeito da massa ao reduzirem a área de superfícies opacas, aumentando o ganho solar e contribuindo para uma troca de

calor mais acelerada entre o meio externo e interno. A unidade (b) com envidraçamento de varanda foi a que apresentou maior variação de temperatura, afirmando o potencial de ganho de calor desse elemento e a rápida troca convectiva de calor. No inverno observa-se a baixa capacidade de conservação do calor devido à elevada área de vidro decorrente do envidraçamento da varanda.

Quanto à variação das soluções arquitetônicas, percebe-se a influência entre os diferentes pavimentos da unidade (d), duplex, que resultou em temperaturas mais elevadas no pavimento superior e maior variação da temperatura operativa interna. O pavimento superior possui menor área de piso e menor volume de ar, está no último pavimento, recebendo radiação horizontal pela cobertura, o que amplifica a capacidade de aquecimento deste ambiente. Assim, a abertura entre esses dois pavimentos na unidade (d) permite e intensifica as trocas térmicas por diferença de pressão, criando um bolsão de ar quente no pavimento superior. Dessa forma, o pavimento superior é mais aquecido do que o inferior apresentando temperaturas internas mais elevadas em ambos os períodos de medição.

Para uma melhor avaliação do comportamento térmico das unidades construiu-se gráficos do perfil de temperatura ao longo dos períodos de medição. No gráfico 4.4 compilou-se todas as curvas de temperatura operativas observadas, juntamente com a curva de temperatura de ar externa e de radiação horizontal global. Nesse gráfico é possível identificar a diferenciação entre as temperaturas de cada unidade e em relação ao comportamento da temperatura externa. Observa-se de maneira global, o descolamento do perfil de temperatura da unidade ocupada (b), em que duração o verão houve acionamento do sistema de condicionamento representado pelas mínimas bastante baixa e constante (cerca de 17°C) durante principalmente o período noturno, de maior taxa de ocupação.

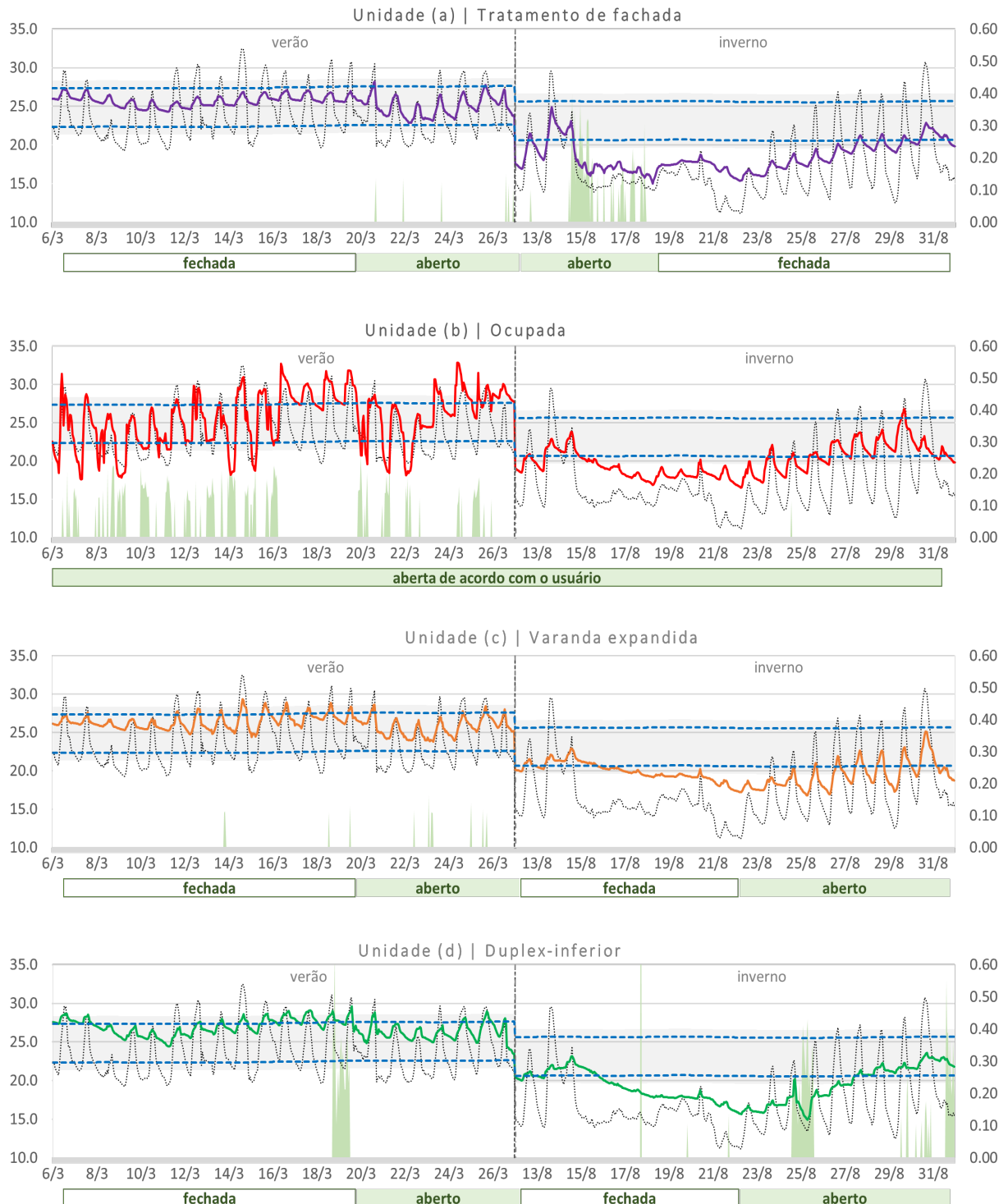
Gráfico 4.4 | Curva das Temperaturas Operativas, Tar externa e Radiação Global

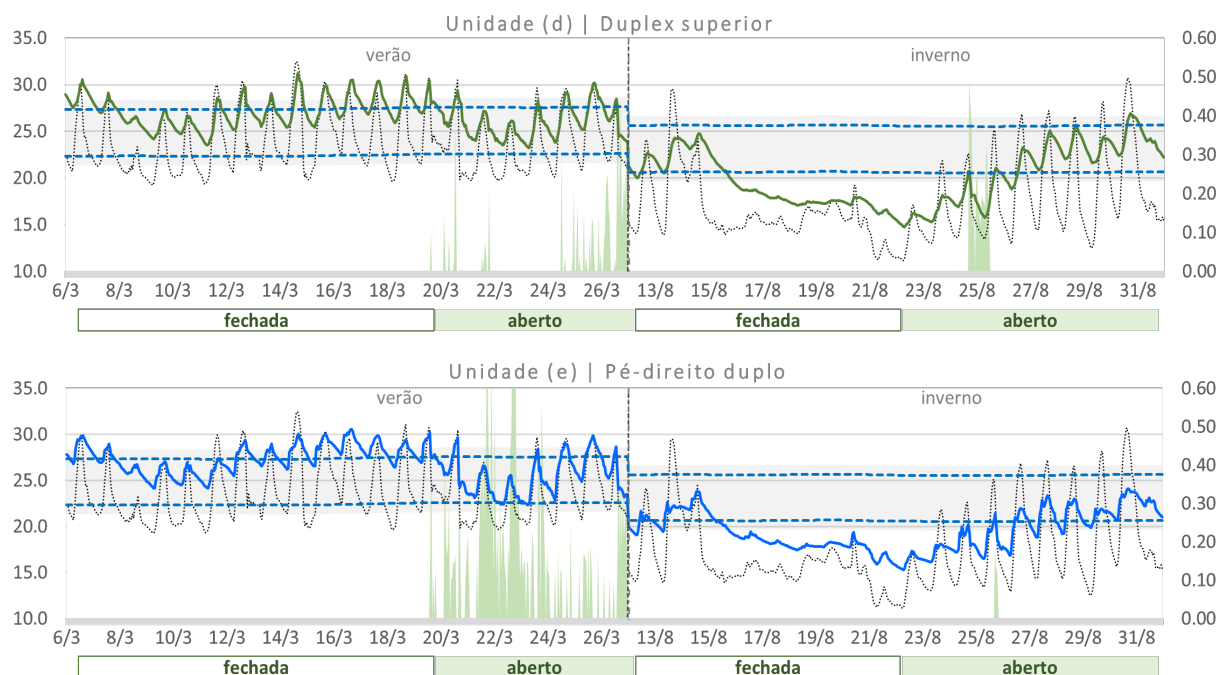


No entendimento do comportamento térmico de cada unidade durante os períodos de medição buscou-se construir análises que permitam a interpretação deste fenômeno (gráficos 4.5). Assim, além do gráfico com perfil em conjunto, elaborou-se gráficos individuais considerando as temperaturas operativas observadas, temperatura externas, velocidade

de ar interna registrada. As temperaturas operativas (T_o), resultantes da relação entre as temperaturas radiantes, de ar e a velocidade do ar interna, permitem compreender melhor o efeito casado dessas variáveis na formação do conforto ao plotar as T_o s em relação à zona de conforto. Ilustrou-se também o período em que as esquadrias permaneceram abertas para entendimento do potencial de ventilação natural de cada unidade.

Gráfico 4.5 | Curva das Temperaturas Operativas e Tar externa, Velocidades de ar internas e zona de conforto adaptativo.





Enquanto as aberturas permaneceram fechadas as velocidades de ar medidas foram desprezíveis, inferior à 0.05 m/s, valor abaixo da faixa de precisão do equipamento. Tais valores foram considerados nulos, por estarem fora da faixa de precisão do equipamento e não afetarem significativamente o cálculo da temperatura operativa. No entanto, a existência desses registros, mesmo que mínimos podem indicar a infiltração das esquadrias e, conseqüentemente afetar a renovação de ar do ambiente. Isto é um indicativo da baixa qualidade das esquadrias, que na maioria das unidades, permite uma elevada infiltração de ar, a fuga de calor e a penetração de partículas sólidas e ruído.

Quanto ao potencial de ventilação com as esquadrias abertas, os resultados indicaram baixas velocidades de ar e mais de 50% do período com as esquadrias abertas movimentação de ar não perceptível ao sensor, resultando em velocidades de 0m/s. No geral, com a porta aberta o que se observa é um aumento da variação da temperatura interna. A ação do vento no interior dos ambientes estudados é mais constante na unidade (a) do que nas demais unidades. Na unidade (b) como o envidraçamento de varanda permaneceu fechado, não se registrou velocidades de ar superiores à 0.1 m/s no período de inverno, indicando a não abertura da esquadria. No edifício 3, a ação do vento, quando ocorre, demonstra-se bastante pontual, indicando uma maior dificuldade de ventilação natural dessas unidades. Como todas as unidades levantadas nesse edifício estão na mesma fachada, possivelmente a localização vertical e a disposição das aberturas sejam fatores mais imperativos à ventilação do que o vento externo. A unidade (d) está localizada no 14º pavimento e apresentou velocidade de ar mais elevada do que a unidade (e), localizada no 3º, e a unidade (c), no 2º pavimento. As análises das máscaras de obstrução em conjunto com os gráficos 4.5 também reforçam o maior potencial de ventilação natural nos andares mais alto.

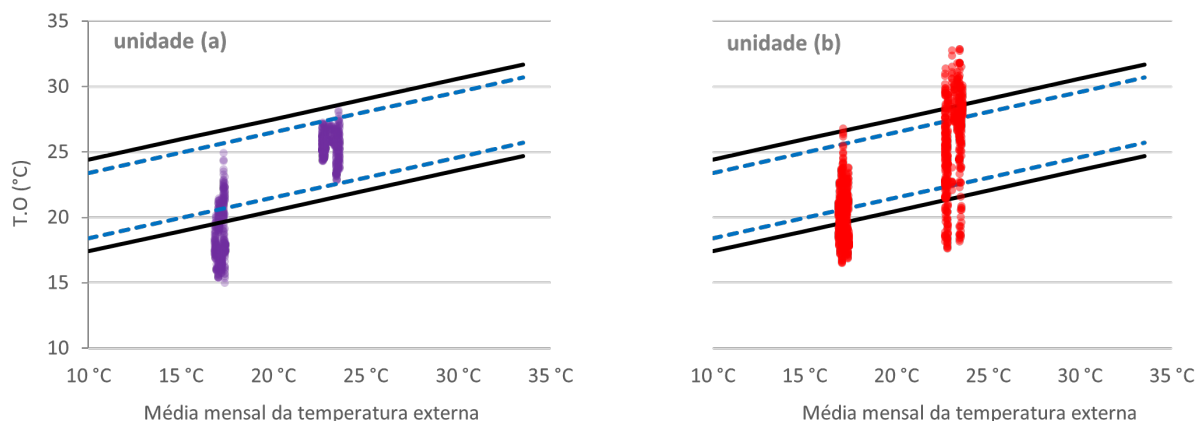
Ainda, as unidades (d) e (e) possuem mais de uma abertura o que deve ter influenciado na movimentação de ar interna. Na (d) pela interligação dos pavimentos há uma movimentação por diferença de temperatura entre os pavimentos, o que tende a promover a ventilação por efeito chaminé. Na unidade (e), há aberturas em faces opostas e em diferentes alturas, ao abri-las, criou-se uma diferença de pressão que provavelmente contribuiu para penetração do ar externo e para ventilação cruzada. Tal unidade (e) demonstra uma ventilação mais constante durante todo o período de porta aberta no verão. Entretanto, no inverno a circulação de ar interna na unidade (e) só é expressiva quando há movimentação de ar externo na direção das aberturas. A indicação de tal movimentação é reforçada ao observa comportamento semelhante durante o mesmo período na unidade (d).

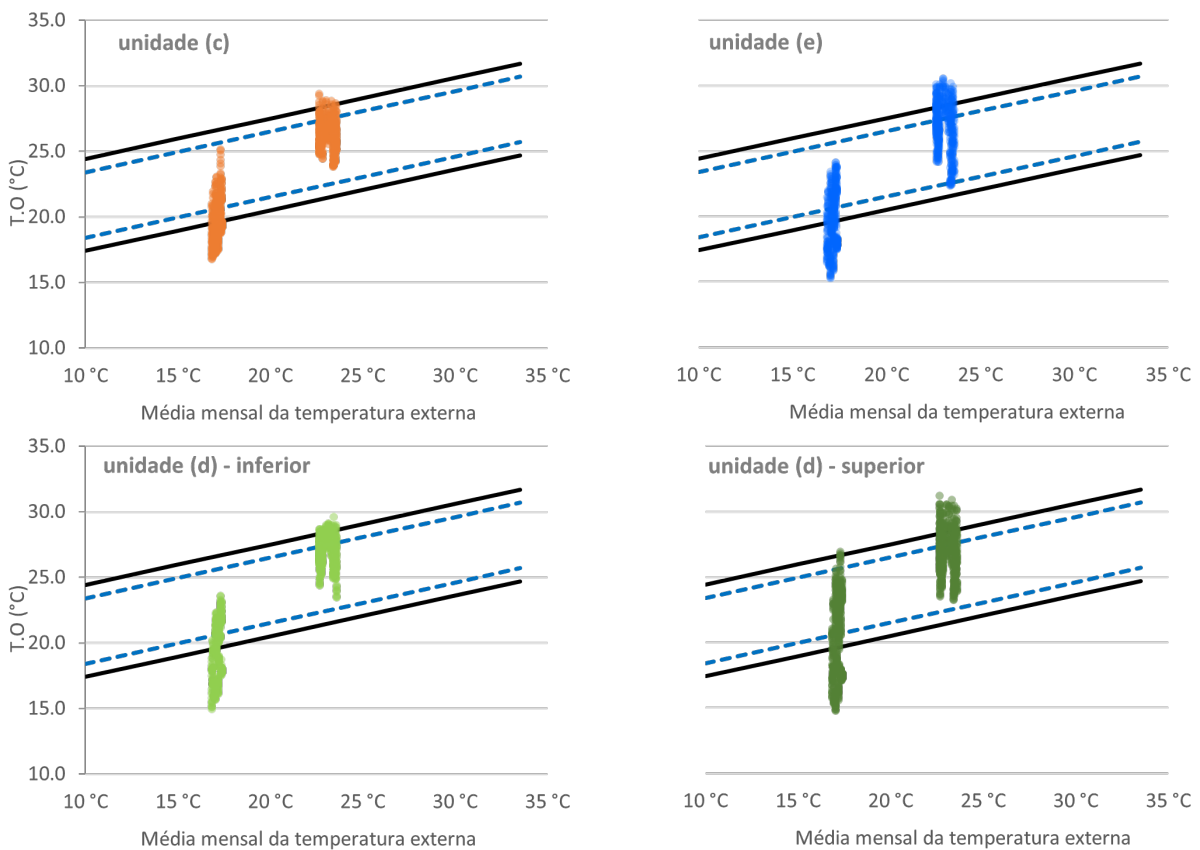
Quanto ao conforto, a tabela 4.6 e os gráficos 4.6 apresentam os resultados em relação à análise de conforto por meio do índice do Modelo Adaptativo da ASHRAE-55. A unidade (a) foi a que apresentou melhores resultados, com curvas mais achatadas, demonstrando pouca variação térmica diária e com maior período dentro da zona de conforto, principalmente no verão em que ficou dentro da faixa de 80% de aceitabilidade em 100% do tempo. As demais unidades não ocupadas indicam uma tendência ao superaquecimento ao terem parte significativa do período de medição no verão fora da faixa de conforto por excesso de calor. Estas unidades não estão ocupadas, ou seja, não possuem carga interna que irá contribuir para o aquecimento do ambiente, indicando a necessidade de estratégias ativas para o alcance do conforto do usuário.

Tabela 4.6 | Análise do conforto adaptativo ASHRAE-55 de cada unidade medida.

Unidades	VERÃO – Faixa de 80% aceitabilidade			INVERNO – Faixa de 80% aceitabilidade		
	calor	conforto	frio	calor	conforto	frio
Unidade (a)	-	100,0%	-	-	29,3%	70,7%
Unidade (b)*	29,6%	58,5%	11,9%	0,8%	53,3%	46,5%
Unidade (c)	2,7%	97,3%	-	-	49,1%	50,9%
Unidade (d)	29%	71,0%	-	2,4%	49,5%	47,1%
Unidade (e)	26,3%	73,7%	-	-	49,5%	50,5%

Gráfico 4.6 | Modelo Adaptativo ASHRAE-55 2019 - cada unidade.

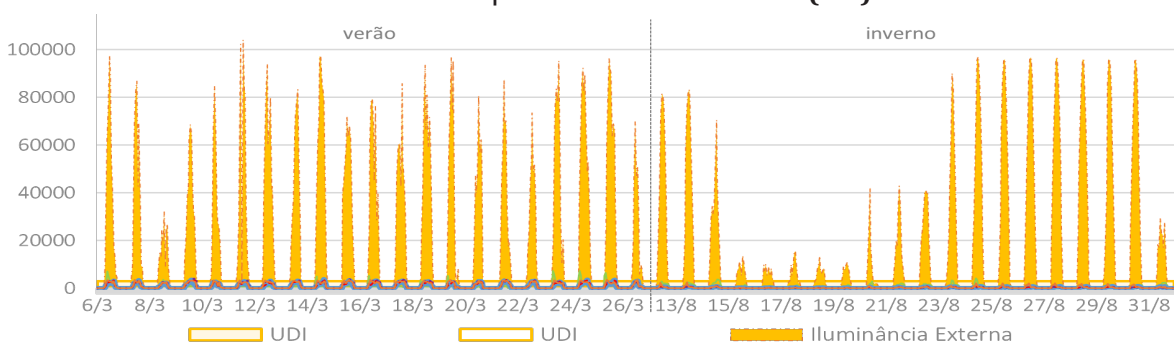




4.4.3. ABORDAGEM AMBIENTAL | LUMINOSA

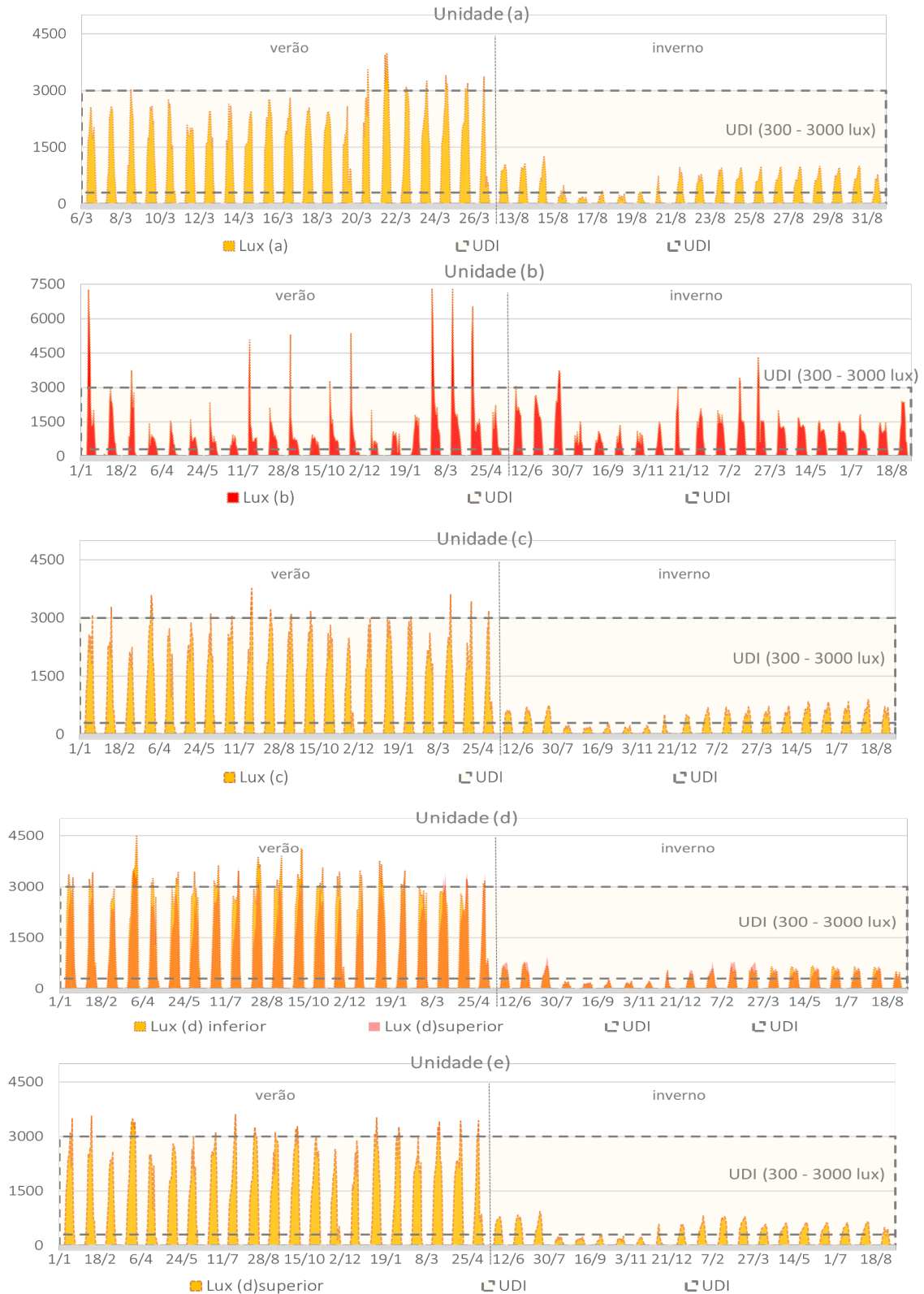
O período medido apresentou diversos dias com céu encoberto durante os levantamentos de inverno, e uma predominância de céu claro no verão, o que pode ser observado no gráfico 4.7 de iluminância externas. Neste gráfico, por meio da fórmula de Alucci (2001), transformou-se os dados de radiação coletados no INMET em iluminâncias para avaliação da luz natural. Em São Paulo, disponibilidade da luz natural decorrente do sol e do céu é abundante, durante a maior parcela do dia. No entanto, o desenho das áreas envidraçadas não faz o uso adequado dessa condição natural, o que intensifica a dependência em sistemas artificiais de iluminação, seja pelo ofuscamento devido a uma distribuição não uniforme, ou pela insuficiência da luz natural.

Gráfico 4.7 | Iluminâncias Externas (lux)



Nos gráficos 4.8 o efeito das soluções arquitetônicas no desempenho da luz natural no ambiente interno é representado ao correlacionar-se as iluminâncias internas medidas nos ambientes estudados com a faixa de iluminâncias úteis da luz natural de 300 a 3000 lux, recomendada por Mardaljevic et Al (2012).

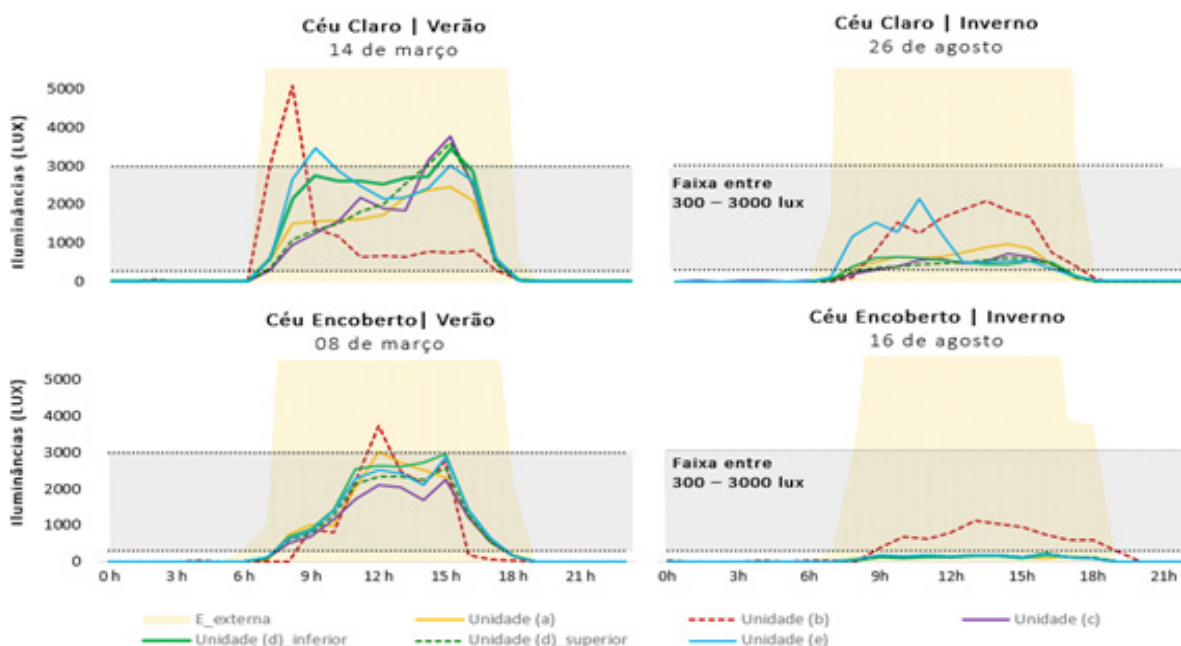
Gráfico 4.8 | Iluminâncias Internas (lux) e faixa de UDI (300 -3000 lux)



Em relação ao conforto luminoso, a penetração da luz natural nos estudos de casos ocorre quase que exclusivamente pelas portas das varandas, com exceção da unidade (e). Elementos estes que tendem a proporcionar uma distribuição heterogênea da luz natural no interior do ambiente, uma vez que estão locados apenas em uma orientação, na vertical e sem diferenças de altura. Os gráficos 4.9 demonstram as iluminâncias observadas em cada unidades durante todo o período de medição, inverno e verão, percebe-se uma disponibilidade muito reduzida durante o inverno em relação ao verão. No entanto, no verão a possibilidade de ocorrência de ofuscamento por excesso de iluminância (acima de 3000 lux) é relativamente elevada.

As medições ocorreram em pontos mais centralizados no interior das unidades que pudessem captar a infiltração da luz natural difusa. No entanto, na unidade (b), por estar habitada, o sensor de medição teve que ser instalado mais próximo à porta da varanda, o que explica os elevados valores de iluminâncias registrados. Além da possibilidade de acionamento da iluminação artificial, que interfere diretamente na medição de iluminâncias, reforçado por valores elevados de iluminância no período noturno e pela ausência de períodos ocupados abaixo da faixa de 300 lux.

Gráfico 4.9 | Iluminâncias Internas (lux) em dias típicos de céu encoberto e céu claro.



De forma geral, observa-se o efeito das varandas e das aberturas na iluminação natural, sendo que unidades com maiores aberturas foram as que apresentaram valores mais elevados de iluminância. Quanto mais próximo da varanda mais elevados são os valores de iluminância, indicando uma distribuição bastante desuniforme da luz. Na unidade (e) em que o pé-direito é duplo, há um aumento da parcela de céu visível, que indica em alguns horários a influência da luz natural direta na composição da iluminação interna.

Para a compreensão do comportamento da luz natural no interior das unidades avaliadas, apresenta-se um gráfico compilado de iluminância de um dia com céu encoberto e outro com céu claro para ambos os períodos de medição.

Tabela 4.7 | Porcentagem de Iluminâncias Úteis da Luz do dia (UDI 300- 3000lux)

Características Construtivas						Porcentagem dentro da faixa de UDI			
						Período Total		Dias Típicos	
Unidade	Orientação	Andar	P.D	Área de piso	WWR	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Unidade (a) F. Ventilada		2º	2,68m	22,3m²	8,9m²	83,4%	58,5%	95,8%	0%
Unidade (b) * Habitada		16º	2,54m	28m²	6,9m²	73,6%*	87,5%*	83,3%*	100,0%*
Unidade (c) Estendida		2º	2,70m	16m²	3,2m²	81,1%	50,8%	87,5%	0%
Unidade (d) Duplex		14º	2,70m	24,4m²	6,5m²	64,9%	58,5%	91,7%	0%
Unidade (e) Loft		3º	5,64m	22,1m²	8,6m²	83,4%	59,0%	87,5%	0%

A avaliação das iluminâncias da luz do dia úteis (UDI) do período de medição indicou um atendimento satisfatório da iluminação no verão, com percentual médio de 75% entre 300lux e 3000lux, e uma redução acentuada da disponibilidade de iluminâncias durante o inverno, com no máximo 59%. No inverno os resultados demonstraram curto período com autonomia da luz natural, principalmente se considerar o potencial de iluminância do ambiente externo. Tal situação é decorrente da somatória do sombreamento prolongado das varandas com orientação de baixa insolação direta dos estudos de caso. No dia típico de inverno, em que há predominância do céu nublado, conforme demonstrado na tabela 4.7, os resultados indicaram a necessidade de uso da iluminação artificial durante todo o dia, seja esta complementar a iluminação natural ou total.

Não obstante, as medições foram realizadas no centro das unidades e os baixos valores (0% de iluminâncias úteis) evidenciam uma distribuição heterogênea das iluminâncias, afirmada pelos resultados da unidade (b) em que o sensor ficou mais próxima da porta e atinge-se 86% de iluminâncias úteis. Outro ponto a ser elencado é a possibilidade da ocorrência de ofuscamento por excesso de iluminância no verão por apresentar valores superiores à 3000 lux em diversos momentos, com exceção da unidade (a).

4.5. ETAPA 5 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como a relação espacial é mais operante na formatação do conforto termo-luminoso, levou-se também em consideração, na análise das unidades levantadas, as soluções arquitetônicas e construtivas adotadas. Assim, os levantamentos não contribuíram apenas com a quantificação das variáveis ambientais, mas à análise qualitativa dos espaços apresentados ao debruçar-se na correlação das soluções projetuais e ambientais. Ao compreender que as soluções arquitetônicas e construtivas adotadas são imperativas à promoção do conforto termo-luminoso é possível investigar e identificar padrões que afetam o desempenho dos estudos de caso na tipologia abordada.

Os resultados obtidos quando analisados em conjunto indicaram a incapacidade das soluções adotadas em incorporar os potenciais bioclimáticos da região em que as unidades estão inseridas o que culminou em ambientes com distribuição luminosa inadequada, com tendência de sobre aquecimento (cerca de 29% de desconforto por calor no verão) e baixo potencial de ventilação natural. Em casos de espaços semelhantes, mas com soluções mais adequadas às questões bioclimáticas, os resultados obtidos demonstraram um desempenho expressivamente melhor. Em estudo sobre quitinetes do edifício Copan, Gonçalves et al (2018) obtiveram uma variação da temperatura interna entre 0,5 e 1°C, tanto no verão quanto no inverno.

Segundo os autores (GONÇALVES et al, 2018), a massa térmica, ao contribuir para uma temperatura superficial interna menor que a temperatura do ar no verão, exerce papel fundamental em espaços reduzidos, principalmente em climas subtropicais como da cidade de São Paulo. Assim, o efeito do calor radiante das superfícies nesses ambientes pode resultar tanto em desconforto por assimetria, quanto em superaquecimento. Por tratar-se de espaços compactos, a proximidade do usuário com a envoltória é mais frequente, intensificando a ação dessas superfícies na sensação de conforto.

Não obstante, manter-se dentro da zona de conforto no período noturno em ambientes residenciais é de suma importância, principalmente para não afetar a qualidade do sono. As alternativas de adaptação dos usuários para atingir o conforto são mais eficientes no inverno do que no verão e, portanto, deve-se atentar-se ao superaquecimento nesse período de ocupação. Como os levantamentos, na maioria, ocorreram em espaços vazios algumas ponderações devem ser consideradas quanto aos resultados encontrados, pois ao introduzir a carga térmica interna devido à ocupação eleva-se as temperaturas internas impactando diretamente a formatação do conforto do usuário. Para tanto, os gráficos 4.10 fazem um recorte para a avaliação do conforto em dias típicos de verão e inverno, com as aberturas fechadas, possibilitando a compreensão mais assertiva e detalhada do comportamento de cada unidade durante o dia e a noite.

Na comparação entre os dias típicos (os gráficos 4.10 e 4.11) o desempenho observado é bastante aquém do estipulado pelas faixas de aceitabilidades de conforto do modelo adaptativo ASHRAE 55-2019, com exceção da unidade (a) no verão. Todas as unidades no inverno ficaram abaixo do limite da zona de conforto de 80% de aceitabilidade e a diferença de temperatura entre o ambiente externo e interno é menor e mais constante no inverno. Com exceção da unidade (b), as demais não estavam ocupadas e, portanto não houve a contribuição da carga interna nas temperaturas internas, que tenderiam a ser mais elevadas. No verão verifica-se um aquecimento durante o dia, com pico no período da tarde e que se conserva durante a noite. Além disso, averiguou-se uma maior dificuldade de dissipação noturna do calor acumulado durante o dia no verão.

Gráfico 4.10 | Avaliação do conforto adaptativo (ASHRAE-55) em dias típicos de verão e inverno.

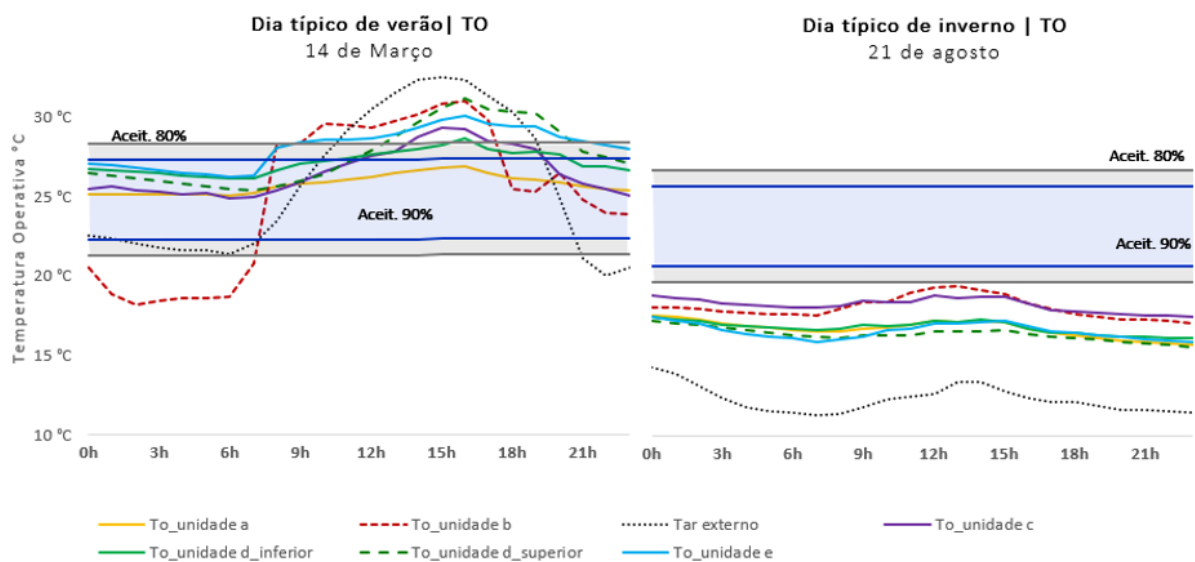
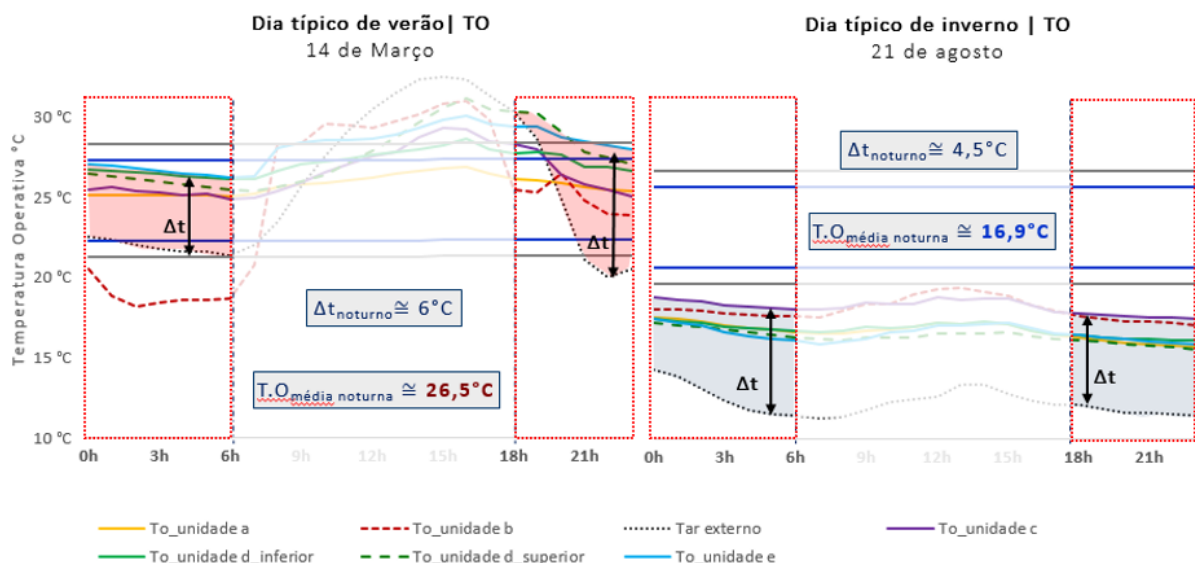


Gráfico 4.11 | Avaliação do conforto adaptativo (ASHRAE-55) durante o período noturno - sono.



O conforto foi avaliado por meio do índice do modelo adaptativo da ASHRAE 55, que foi desenvolvido em espaços onde o uso é preponderantemente diurno e, portanto, pode ocorrer discrepâncias entre a faixa de conforto do modelo e a percepção de conforto do usuário. Pesquisas com foco em ambientes residenciais têm sido conduzidas ao redor do mundo (Alex et al, 2012; Bravo et Gonzalez, 2013; Yang et al, 2013; Indagranti, 2010) para definição de índices de conforto adaptativo mais compatíveis a esses espaços e a diferentes contextos climáticos. Tais pesquisas demonstraram que em climas subtropicais e tropicais (Venezuela, Camarões, Índia e China) os usuários estão climatizados em temperaturas mais elevadas, o que poderia resultar na redução do consumo de ar-condicionado e no aumento da faixa de conforto para esses contextos climáticos.

Pelo modelo adaptativo da ASHRAE 55 nenhuma das unidades estudadas ficaria dentro da faixa de 80% de aceitabilidade no dia típico de inverno, inclusive a unidade ocupada (b). No entanto, a média da temperatura operativa interna foi de 16,9°C, não tão aquém a da faixa de 80% de aceitabilidade (cerca de 19°C) e, portanto, o alcance do conforto em tal situação requer estratégias de adaptação mais factíveis por parte dos usuários, como o incremento de vestimentas e camadas de coberturas na cama. Para avaliação do usuário no período do sono deve-se considerar a capacidade de troca radiante entre os estofados e o ser humano, o acréscimo da resistência das vestimentas, e a produção de calor interno. Segundo Lin e Deng (2008), o efeito do isolamento térmico do sistema da cama na temperatura operativa é de aproximadamente 5,3°C por clo, o que afeta significativamente a temperatura neutra durante o sono.

Ainda, durante o sono a capacidade de adaptação do usuário é limitada (DE DEAR et al, 2009) logo o espaço deve atuar mais preponderantemente na formatação do conforto. A tendência de superaquecimento desses ambientes é reforçada na análise do dia típico de verão, onde todas as unidades indicaram aquecimento no período da tarde e uma lenta dissipação desse calor durante à noite, com exceção da unidade (a). O efeito negativo do aquecimento é evidenciado na curva da unidade ocupada (b), onde há o acionamento do condicionamento à tarde e a permanência deste até o início da manhã, indicando a necessidade de utilização de soluções ativas para atingir o conforto.

Na unidade (b), o acionamento do ar condicionado individualizado resultou em faixas de temperaturas abaixo da zona de conforto entre as 24h e 6h, indicando a baixa eficiência do equipamento, seja devido à localização da saída de ar, ou ao elevado delta de temperatura interna que induzem o insuflamento de temperaturas mais baixas para o alcance da temperatura ambiente desejada pelo ocupante. Soluções individualizadas de sistemas de condicionamento, tipo "split", está prevista em todos os estudos de caso. Também foi verificado a predominância dessa solução nos atuais empreendimentos de microapartamento. Aliado a isso, ao não preverem sistemas integrados de condicionamento, deixam a responsabilidade da definição e da instalação de equipamentos individualizados aos

moradores, o que tendem a diminuir a eficiência energética do sistema, induzindo situações em que a estética ou a disposição do mobiliário afeta o desempenho dos equipamentos, conforme a verificada na unidade (b).

De fato, o que se constatou foi a ausência de esquadrias com controles mais elaborados de ventilação e iluminação que propiciassem adaptações à diversidade de uso inerente à ocupação dos microapartamentos, como ventilação noturna ou combinação entre controles da luz natural e a manutenção da ventilação natural. Além disso, a forma como as esquadrias são fabricadas e projetadas fomenta uma série de interferências que induz conflitos entre suas diversas funções e penaliza seu desempenho, permitindo a infiltração de particulados que podem afetar a qualidade do ar interno. Tal situação pode acarretar um aumento expressivo do consumo energético e prejuízos a acuidade visual e a saúde do usuário.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os levantamentos de campos permitiram a coleta de dados que foram utilizados na validação das simulações de térmica e luminosas na fase de pré-modelagem, como também possibilitou a sensibilidade de parâmetros de entrada. A partir dos dados de temperatura de ar interna e de iluminância das unidades (c), (d) e (e) verificou-se as aderências das simulações que serão aplicadas ao modelo parametrizado na fase de modelagem.

Além disso, avaliação de cinco estudos de caso durante períodos representativos de verão e de inverno por meio de medições in loco possibilitou averiguar o desempenho termo-luminoso da recente produção de microapartamentos. Os resultados demonstram a baixa qualidade ambiental dos estudos de casos avaliados, visto que a maioria apresentou desempenho térmico inadequado ao período analisado. As avaliações permitem induzir que os aspectos climáticos, as especificidades da implantação e a qualidade ambiental dos espaços foram negligenciados no processo de concepção e de desenvolvimento do projeto.

Em ambientes residenciais e multifuncionais, como os estudados, a busca pela qualidade ambiental por meio de estratégias passivas é essencial para a eficiência energética e a redução de emissão de carbono, principalmente em climas amenos como o da cidade de São Paulo. O incentivo na dependência de soluções ativas de climatização a partir de equipamentos individualizados, como é o previsto em todas as unidades estudadas, pode acarretar prejuízos ao bem-estar e a saúde dos ocupantes. Estes sistemas podem afetar a qualidade do ar interno, ao confinarem o ambiente, dificultando a renovação de ar e a retirada de CO₂ resultante da respiração humana.

Apesar da ocupação ser predominantemente noturna, é importante considerar também a influência da iluminação natural no período da manhã e nos finais de semana, além da sua relação com o conforto térmico e seus ganhos na qualidade visual e na percepção do

espaço. A iluminação natural é uma importante questão na arquitetura ao afetar o arranjo funcional dos espaços, o conforto dos ocupantes (visual e térmico) e o consumo energético do edifício. O território brasileiro é abundante em luz natural e como fonte sustentável e de excelente qualidade, absorvê-la nos projetos de arquitetura torna-se imperativo. Ademais, a pandemia aumentou expressivamente o trabalho remoto, o que exige melhor desempenho dos espaços residenciais para garantir a adequada qualidade ambiental e o conforto dos usuários, principalmente no período diurno. Tais alterações comportamentais, sociais e ambientais devem ser ponderadas na avaliação do conforto ambiental e na concepção dos espaços.

5.1. INTRODUÇÃO

A fase de pré-modelagem abarca as avaliações e os estudos que embasaram o desenvolvimento consistente do modelo parametrizado, imprimindo confiabilidade e credibilidade aos resultados. Ainda, é nessa fase que se investigou as incertezas inerentes às simulações a partir das validações das simulações. Tal fase foi dividida em três etapas: eleição do arquivo climático, validação das simulações e análises de sensibilidade local.

A etapa arquivo climático realizou análises de arquivos climáticos elencando o mais adequado a ser utilizado nas simulações e no modelo parametrizado, além de demonstrar a construção do arquivo climático do ano de referência das medições que foi utilizado na etapa de validação. A validação das simulações verificou a aderência das simulações por meio da correlação entre os dados simulados e os medidos. A etapa subsequente, análises de sensibilidade local, teve como objetivo a definição das faixas de variação dos parâmetros de entrada que serão incorporados no modelo parametrizado.

5.2. ARQUIVO CLIMÁTICO

As simulações dinâmicas de avaliação do desempenho termo-luminoso possibilitam reproduzir situações mais realísticas das condições climáticas externas ao ser basearem em dados climáticos coletados. Entretanto, a ineficácia dos dados de um arquivo climático reproduz erros nos resultados das simulações, influenciando a análise das estratégias que devem ser incluídas na edificação para melhorar as condições de conforto. Uma das maiores dificuldades no tocante às simulações é a inadequação dos dados climáticos disponíveis, uma vez que estes são gerados para subsidiar o planejamento agrícola e não o ambiente construído (PEREIRA, 2004). Segundo Lamberts (2015), a localização das estações climáticas, em sua maioria em aeroportos, não permite registrar os efeitos da cidade no microclima, o que pode acarretar imprecisões às bases dados climáticos.

As avaliações termodinâmicas e luminosas com base em dados do clima utilizam, majoritariamente, arquivos climáticos normalizados. Tais arquivos são normalizados a partir de um ano típico que pode resultar de duas fontes de cálculos (ASHRAE, 1993): o Test Reference Year (TRY), desenvolvida pelo National Climatic Center e Typical Meteorological Year (TMY), desenvolvido pela Sandia Laboratories.

O TRY é um procedimento baseado na eliminação sucessiva de anos de dados que contenham temperaturas médias mensais extremas, até permanecer somente um ano (GOULART, 1998). Este ano será designado como Ano climático de Referência e abrange variáveis de temperatura de bulbo seco; temperatura de orvalho; umidade relativa do ar; direção e velocidade dos ventos; nebulosidade; pressão barométrica e radiação solar. As informações climáticas são organizadas por hora, contabilizando no ano um total de 8.760

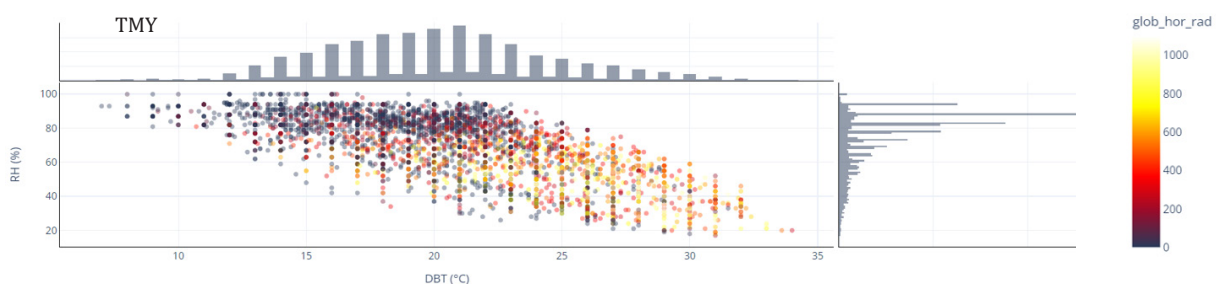
horas. Quanto ao TMY, o procedimento parte da compilação de meses sem extremos de temperatura, com base em uma série de dados anuais disponíveis. Representa também um ano climático sem extremos de temperatura.

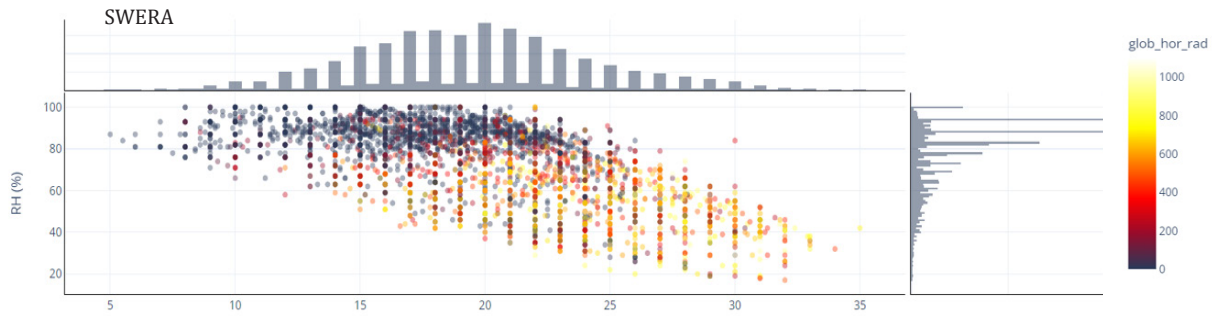
Além das metodologias de cálculo para constituição do ano típico, há uma série de fatores que influenciam o tratamento de dados dos arquivos climáticos, permitindo a produção de inúmeros bancos climáticos originados da mesma estação meteorológica, como o caso das estações meteorológicas do INMET. No Brasil, dentre as metodologias e fontes de arquivos climáticos compatíveis aos programas de simulação computacional destacam-se o Test Reference Year (TRY), Test Meteorological Year – TMY, o Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), International Weather for Energy Calculations (IWEC) e os dados medidos de estações automáticas do Instituto de Meteorologia (INMET), todos com extensão epw (LAMBERTS, 2015).

Para o desenvolvimento dessa pesquisa é de suma importância que o arquivo climático a ser utilizado nas análises dedutivas apresente precisão tanto nas variáveis de temperatura, umidade e vento, quanto nas de radiação solar. Portanto, o primeiro recorte para definição do arquivo climático a ser utilizado, dentre as fontes citadas anteriormente para o Brasil, foi o período base utilizado. Até o momento dessa pesquisa (2021), os arquivos climáticos Sao. Paulo-Congonhas.AP.837800_TMYx.2004-2018, disponibilizado por Onebuilding (climate.onebuilding.org) e o BRA_Sao.Paulo-Congonhas.837800_SWERA, por DOE (sam.nrel.gov/weather-data.html), foram desenvolvidos com base em períodos mais recentes. Além disso, são os únicos mapeados pelas ferramentas CBE climate tool, desenvolvida pela Berkely (Betti, G et al, 2021) e por Epwmap pela Thornton Tomasetti Core-Studio, que são especializadas em análises e validação de arquivos climáticos.

Investigou-se por meio de análises comparativas de dados e de levantamentos bibliográficos para elencar qual seria mais adequado no uso das simulações computacionais dessa pesquisa. Frente a isso, este trabalho apresenta a comparação entre os arquivos climáticos TMY e SWERA através das variáveis de temperatura de bulbo seco, velocidade de ar e radiação global e difusa horizontal. Esta comparação irá identificar possíveis incertezas dos dados climáticos analisados e indicar qual arquivo é mais apropriado ao uso nesta pesquisa.

Gráfico 5.1 | Correlação entre Umidade Relativa (UR), Radiação Global Horizontal e Temperatura de Bulbo Seco (TBS)





5.2.1. VARIÁVEL AMBIENTAL | VELOCIDADE DE AR

A velocidade de ar é uma variável ambiental do arquivo climático que impacta substancialmente os estudos de ventilação natural e influenciam os resultados de conforto térmico do usuário. Vallis et al. (2017) apresentaram uma revisão dos dados de vento registrados nas estações climáticas brasileiras, cobrindo a rede da FAB (Força Aérea Brasileira) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e identificaram incertezas nos dados. Os autores destacam uma série de problemas encontrados nos registros de dados, principalmente em relação (1) à instalação dos anemômetros em diferentes alturas; (2) leituras realizadas manualmente até a década de 90; (3) a velocidade média era calculada mentalmente pelo operador da estação; (4) a FAB possui somente uma estação automatizada com operação diurna; (5) o INMET possui 524 automatizadas, que iniciaram a partir de 2000; e (6) erros nos relatórios são comuns.

Westphal, F.S. (2020), ilustra por meio da figura 5.1. os dados de velocidade do vento dos quatro arquivos climáticos da cidade de São Paulo disponíveis para uso em simulação computacional no programa EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2019) por meio da ferramenta de Marsh (2020). O autor afirma que o arquivo no formato SWERA possui alguns valores espúrios de velocidade muito altos e que não foram tratados, e o do INMET (TMY) possui uma queda abrupta no meio do ano.

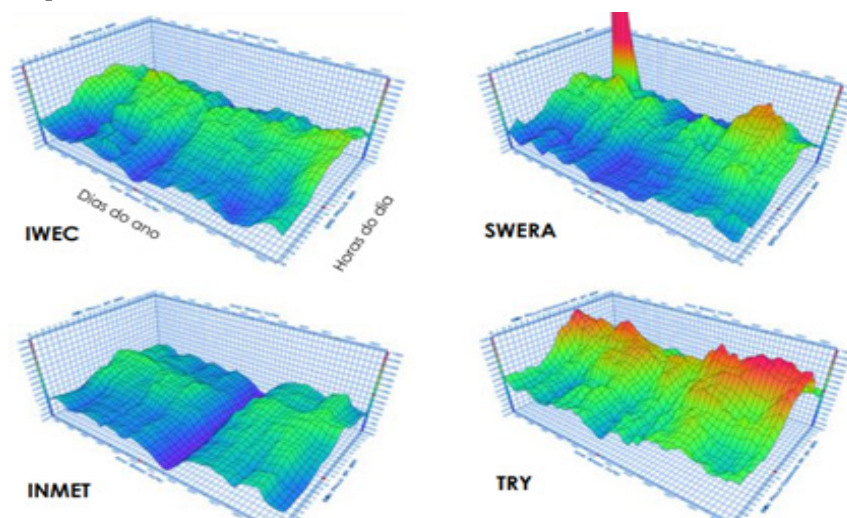
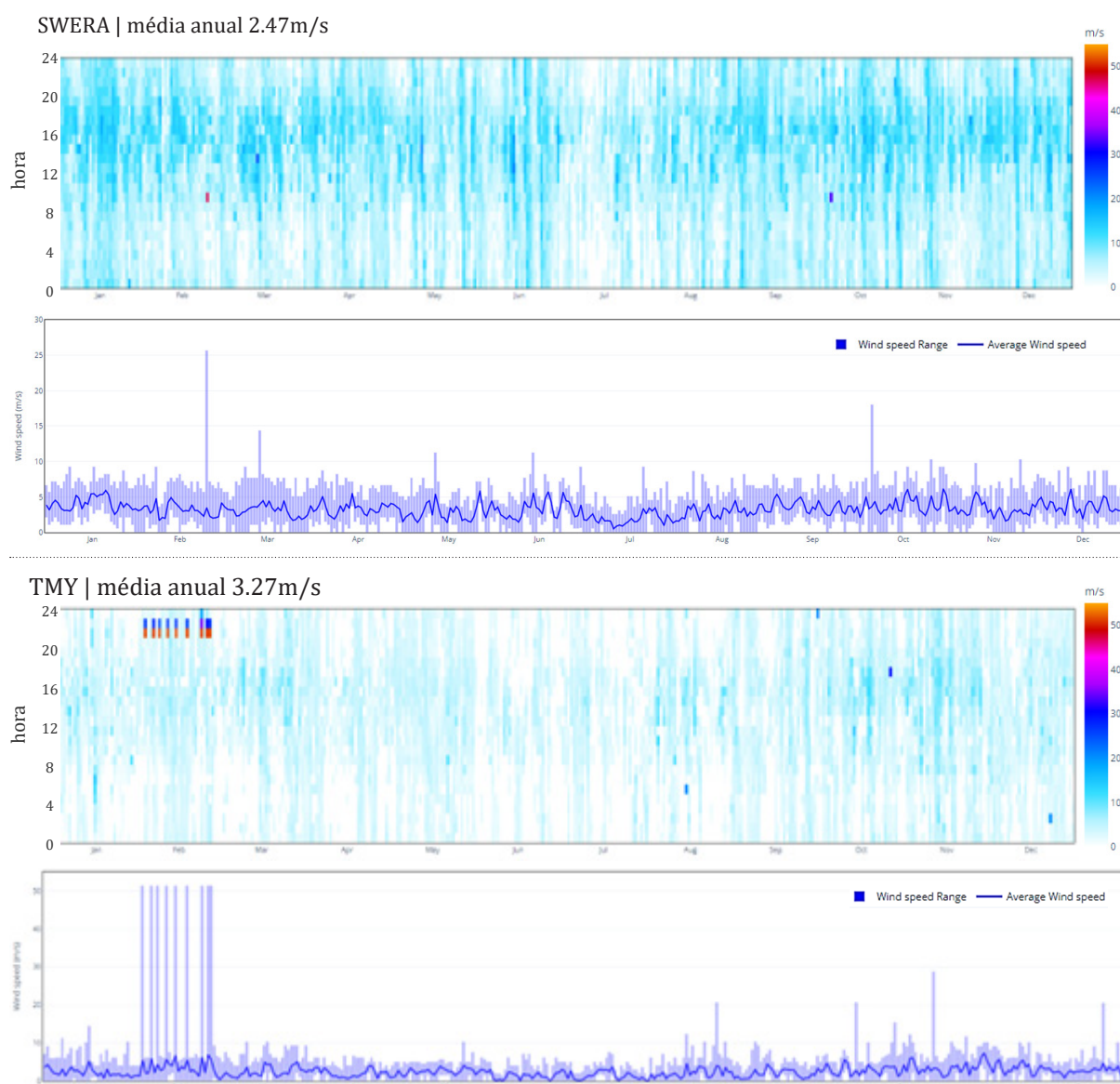


Figura 5.1 | Dados horários de velocidade de vento registrados em quatro arquivos climáticos da cidade de São Paulo | Fonte: Westphal, 2020

As análises climáticas comparativas dos arquivos SWERA e do TMY realizadas a partir da ferramenta CBE Clima Tool. Version 0.6.6 (Betti, G et al, 2021) indicaram valores semelhantes, tanto em relação aos espúrios de velocidade de ar do arquivo SWERA, com valores superiores à 50m/s, quanto a queda no mês de junho do arquivo TMY. No entanto, as médias anuais e os valores horários no arquivo TMY 2004-2018 são superiores aos valores encontrados no arquivo SWERA, sendo o TMY com média anual de velocidade de ar de 3.27m/s e o SWERA de 2.47m/s.

Gráfico 5.2 | Velocidade de vento (m/s) horária dos arquivos climáticos SWERA x TMY

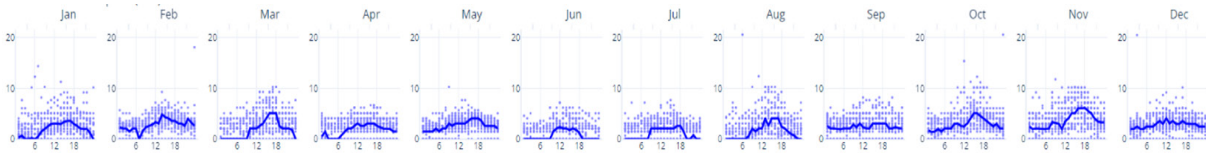


Na pesquisa desenvolvida por Westphal (2020) não há indicação do arquivo climático mais adequado às simulações, mas há ressalvas de que as diferenciações das velocidades de ar de cada arquivo impacta significativamente nos resultados das simulações em especial às trocas de ar e às hora-graus para condicionamento. Para este trabalho, entende-se que é mais apropriado o uso de arquivo climático que apresente o menor número de dados espúrios e, portanto, o TMY seria o arquivo a ser utilizado. Neste caso, o gráfico 5.3 indica

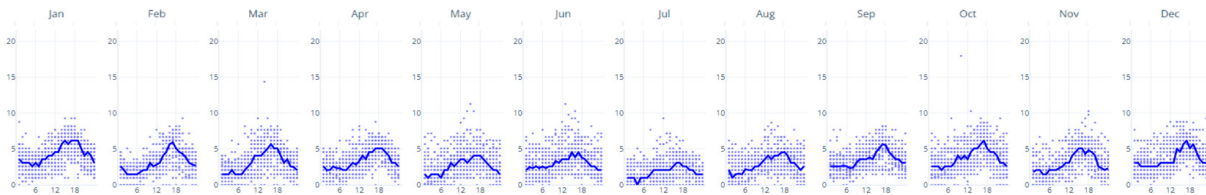
que o arquivo climático TMY apresenta um perfil de velocidade de ar diária e média anual superiores aos observados no arquivo SWERA, o que tende a gerar valores maiores de troca de ar.

Gráfico 5.3 | Velocidades de vento diárias - médias - dos arquivos climáticos SWERA x TMY

SWERA | média anual 2.47m/s



TMY | média anual 3.27m/s

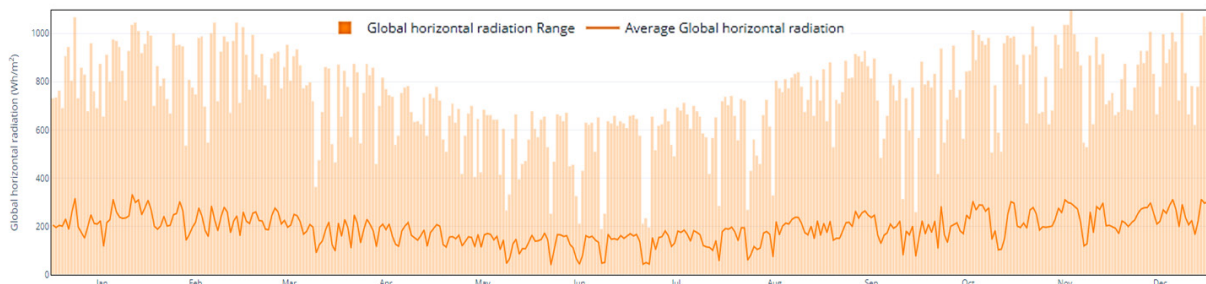


5.2.2. VARIÁVEL AMBIENTAL | RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar impacta tanto as avaliações térmicas, quanto luminosas. Há uma menor discrepância entre os arquivos em relação à distribuição, perfil e aos valores de radiação global e difusa. Os arquivos TMY base INMET até 2012 apresentavam um atraso no horário de pico máximo da radiação global (LAMBERTS, 2015). O arquivo TMY 2004-2018 passou por revisão da análise dos dados de irradiância global horizontal e tais atrasos foram corrigidos, conforme ilustrado nos gráficos 5.4 e 5.5. Ainda, o gráfico 5.4 apresenta uma menor queda da radiação global diária, em especial entre os meses janeiro a abril.

Gráfico 5.4 | Radiação Global horária dos arquivos climáticos SWERA x TMY 2004-2018

SWERA | média anual 191 (wh/m²)



TMY | média anual 190 (wh/m²)

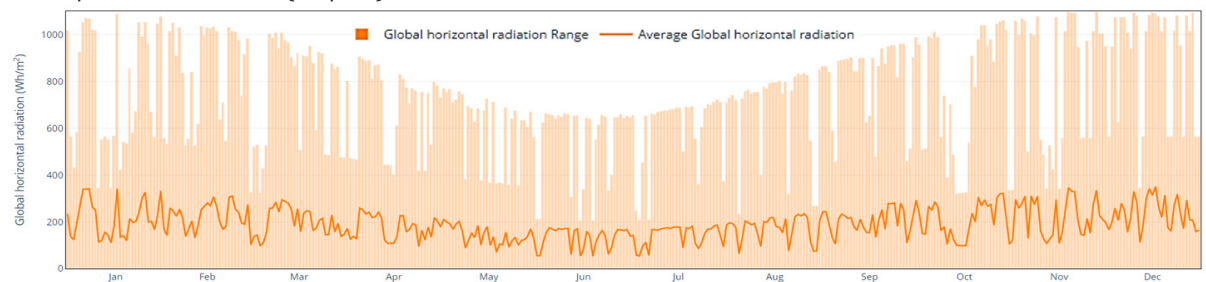
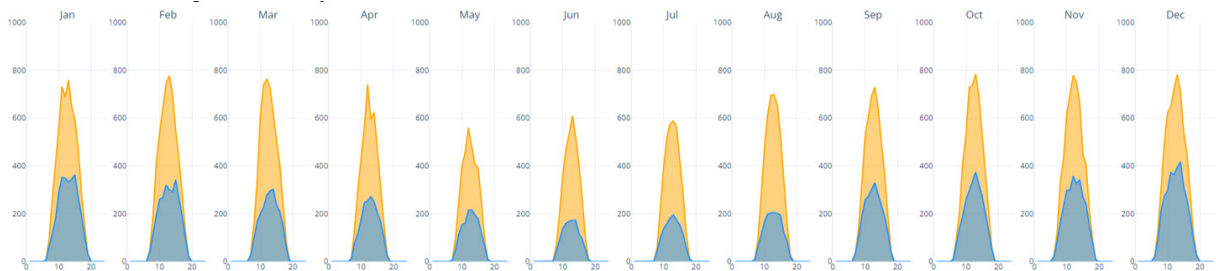
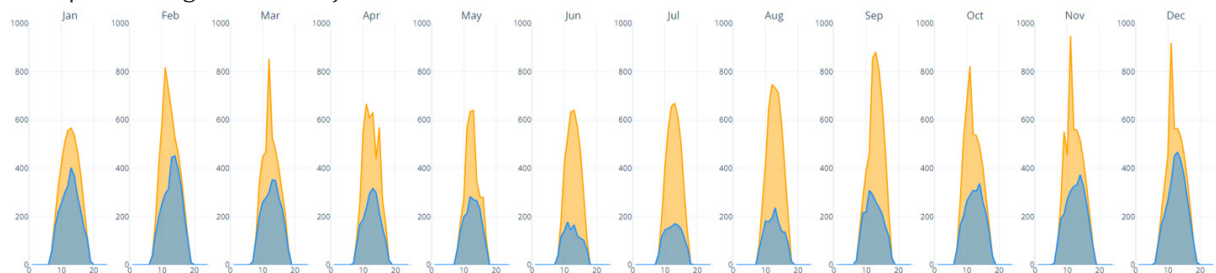


Gráfico 5.5 | Radiação solar global e difusa médias diárias dos arquivos climáticos SWERA x TMY 2004-2018

SWERA | Porcentagem da radiação horizontal solar difusa 49.3%



TMY | Porcentagem da radiação horizontal solar difusa 51.1%

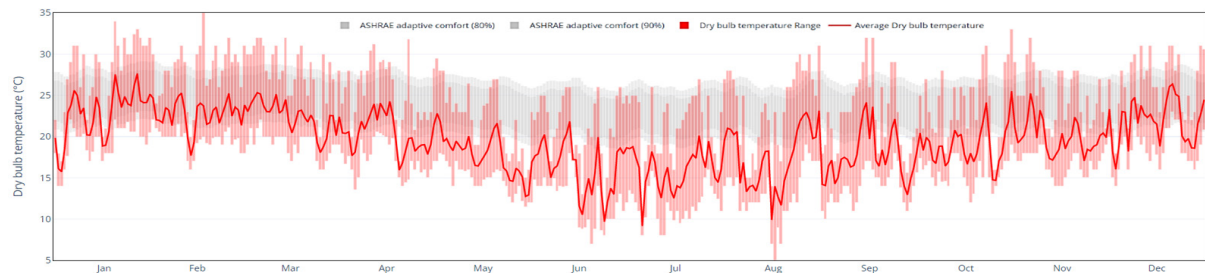


5.2.3. VARIÁVEL AMBIENTAL | TEMPERATURA DE AR (TBS)

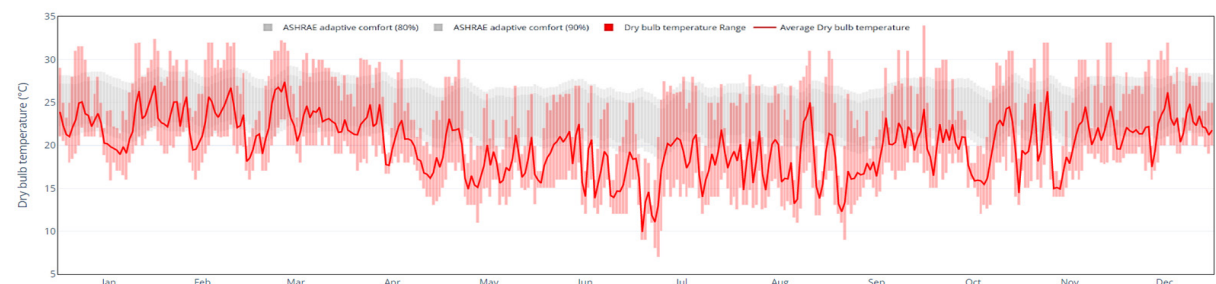
Quanto à temperatura de ar, os arquivos apresentaram pequenas variações entre os valores de máximas, mínimas e médias. Assim como o perfil de velocidade de ar, o de temperatura de ar do SWERA possui maiores picos de máximas e mínimas diárias e amplitudes térmicas mais elevadas. Contudo, o arquivo TMY é composto por um período de medições das variáveis ambientais mais recente e seus valores indicam a elevação geral das temperaturas, tanto a máxima, como a mínima e a média são superiores às do SWERA.

Gráfico 5.6 | Temperaturas de ar (TBS) dos arquivos climáticos SWERA x TMY 2004-2018

SWERA | média anual 19.5°C; mais quente (99%) 31°C; mais fria (1%) 9.2°C



TMY | média anual 20.2°C; mais quente (99%) 30.8°C; mais fria (1%) 11.5°C



Observa-se um padrão bastante semelhantes entre os arquivos, no entanto, no SWERA o mês mais quente é janeiro (média de 22.8°C), no TMY o mais quente é fevereiro (média de 23.3°C). O mês mais frio em ambos é julho com médias em 16°C e 17.4°C respectivamente. Ainda, o gráfico indica a maior ocorrência de mais extremos de temperaturas no arquivo SWERA, do que no TMY.

Com base nas análises expostas, optou-se por utilizar o arquivo climático de BRA_SP_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800_TMYx.2004-2018 nesta pesquisa, por ter como base um período mais recente e por apresentar menores valores espúrios das variáveis climáticas. O arquivo foi utilizado na etapa de modelagem, simulações parametrizadas e testes de sensibilidade, assim como base para construção do arquivo climático do ano de referência dos estudos de aderência das simulações. Ainda, nos gráficos 5.7. e 5.8. há análises comparativas entre as temperaturas de ar externas em relação aos arquivos SWERA e o TMY e o ano de medição. Observa-se uma maior proximidade das curvas das máximas entre a medição e o TMY no gráfico 5.2.6, e no gráfico 5.2.7. uma maior similaridade de comportamento perfil climático mensal do TMY e do arquivo referente às medições, com exceção dos meses de abril, junho e agosto.

Gráfico 5.7 | Comparativo entre as médias máximas e mínimas das temperaturas de ar dos arquivos climáticos SWERA x TMY e do ano de medição de referência (2017-2018)

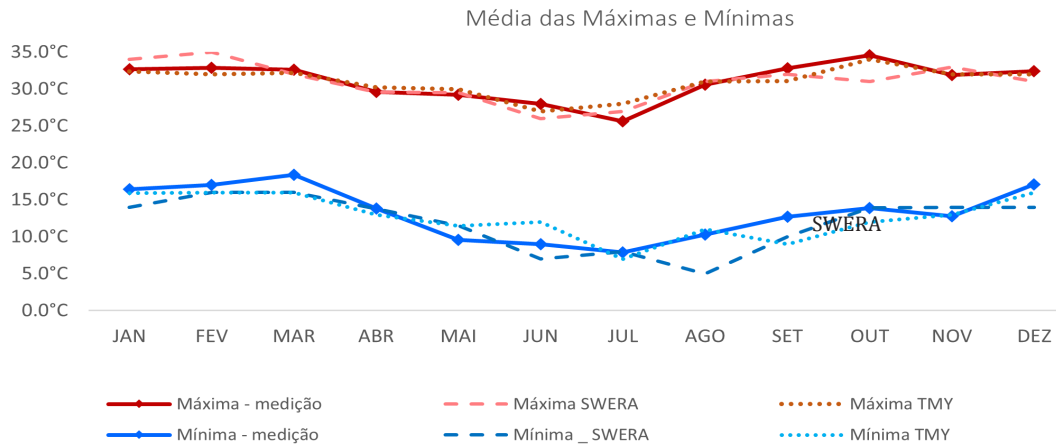
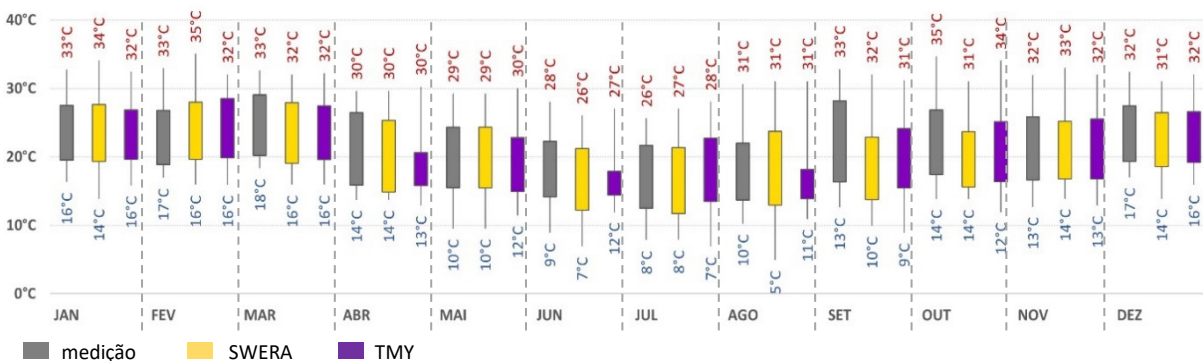


Gráfico 5.8 | Comparativo entre as temperaturas de ar dos arquivos climáticos SWERA x TMY e do ano de medição de referência (2017-2018)

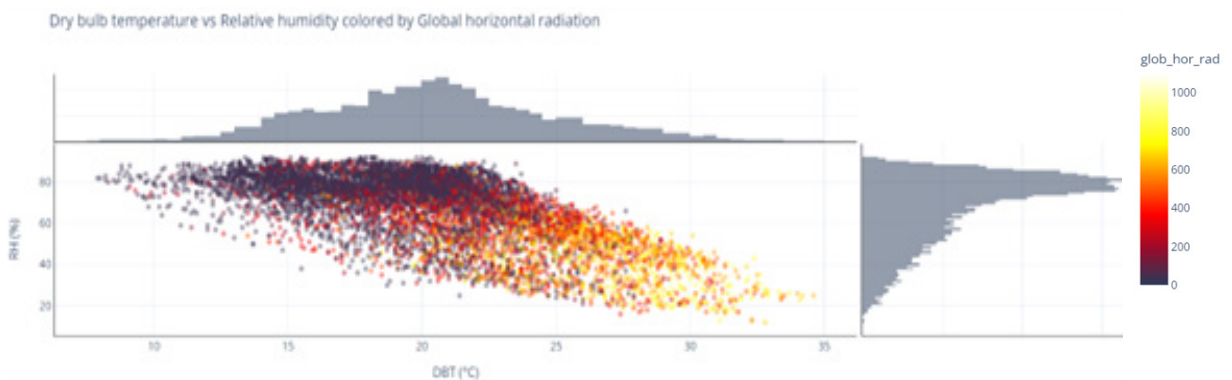


5.2.4. CONSTRUÇÃO DO ARQUIVO CLIMÁTICO DO ANO DE MEDIÇÃO (2017-2018)

Para os estudos de aderência foi gerado o arquivo climático do ano de referência das medições (2017-2018). Este arquivo é composto pelos dados de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho, velocidade e direção do vento proveniente da estação automática de São Paulo (Mirante de Santana) - A701 do INMET, de junho a dezembro de 2017 e de janeiro a maio de 2018. A construção do arquivo climático do ano de citado foi executada por meio do programa Dragonfly (LADYBUG TOOLS, 2020) em que se utilizou o arquivo BRA_SP_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800_TMYx.2004-2018 como base de arquivo climático para os dados que não constavam na estação automática, com exceção das radiações que foram calculadas a partir de modelo solar.

O cálculo das radiações foi realizado a partir do programa Honeybee (LADYBUG TOOLS, 2020) em que se calcula estes parâmetros por meio do modelo solar de Zhang-Huang (Zhang, Q.Y. and Huang, Y.J. 2002). Neste modelo solar calcula-se a radiação global horizontal a partir de dados de temperatura de bulbo seco, velocidade de ar, umidade relativa, índice de cobertura do céu (nebulosidade), altitude solar e a constante extraterrestre solar. Os dados de radiação (direta e difusa) calculados foram inseridos no dragonfly para a construção do arquivo climático do ano de medição.

Gráfico 5.9 | Correlação entre Umidade Relativa (UR), Radiação Global Horizontal e Temperatura de ar (TBS) – arquivo climático ano de referência de medição (2017-2018).



Realizaram-se análises comparativas entre os dados da estação e do arquivo construído por meio de regressões para compreensão da correlação entre os dados coletados e simulados. Considerando o período de medições (março e agosto), a correlação das temperaturas de bulbo seco é de $R^2_{ajustado}=0.915$ e das radiações globais de $R^2_{ajustado}=0.825$. A das radiações foi mais baixa, mas ainda representativa, devido ao índice de cobertura do céu ter sido proveniente do arquivo climático TMY base e não da estação, uma vez que está não mensura tal variável.

Gráfico 5.10 | Dispersão dos dados de radiação (A) e temperatura de ar (B) na correlação entre os dados simulados x coletados (INMET) 2017/2018

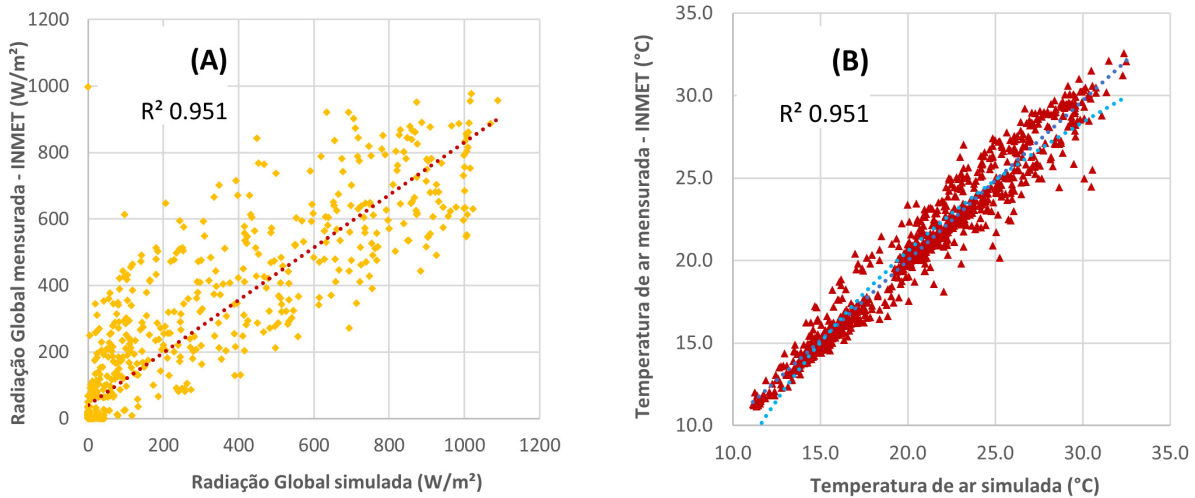
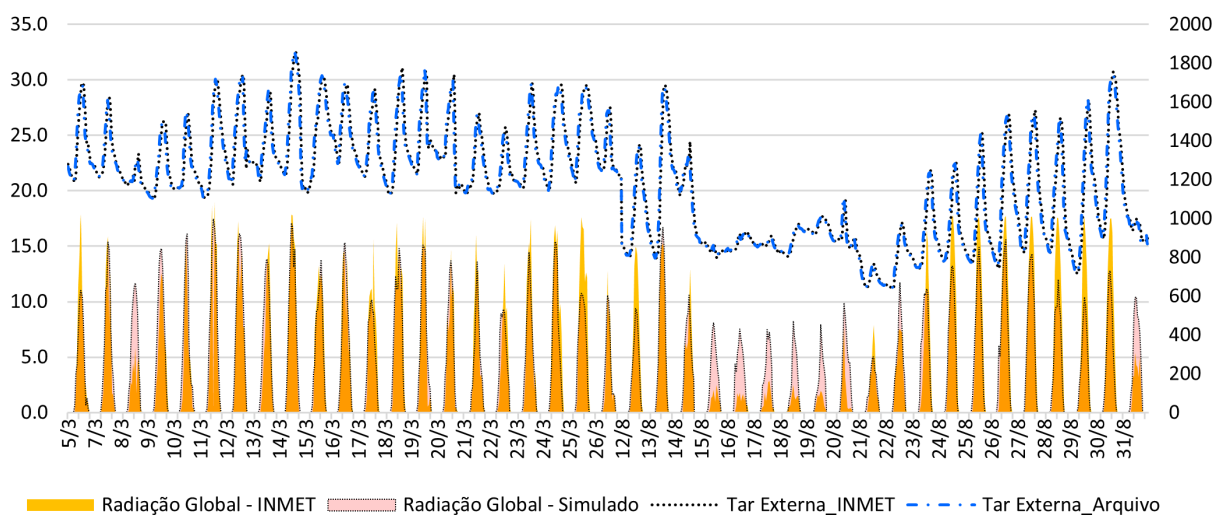


Gráfico 5.11 | Comparação entre as curvas de temperatura de ar e da radiação global dos dados simulados x coletados (INMET) durante o período de medição (2017/2018)



5.2.5. ARQUIVO CLIMÁTICO FUTUROS.

Os arquivos climáticos utilizados na construção civil têm como base dados históricos meteorológicos que não refletem as mudanças climáticas previstas para as próximas décadas. Segundo Dickinson (2016), essa realidade enervante foi a motivação para a criação de arquivos climáticos futuros que refletissem melhor uma série de futuros plausíveis com base no consenso científico e no conjunto de modelos climáticos globais usados para o Quinto Relatório Diagnóstico do IPCC -AR5 (Fifth Assessment Report - IPCC, 2014).

As projeções de mudanças no sistema climático avaliam o balanço radiativo terrestre a partir de cenários de forçantes antropogênicas por meio de simulações de um grupo de modelos de avaliações integradas. O conjunto de modelos climáticos globais usados no

AR-5 fazem parte do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - CMIP5, 2014) e produziram os cenários futuros denominados RCPs - Representative Concentration Pathways (IPCC, 2014).

Os RCPs levam em consideração os impactos das emissões e são identificados por sua forçante radiativa total (W/m^2) a ser atingida durante ou próximo ao final do século XXI. Ainda, para todos os cenários foram previstas concentrações atmosféricas de CO₂ mais elevadas em 2100 do que as verificadas até 2014 resultantes do aumento adicional das emissões cumulativas de CO₂ durante o século 21 (IPCC, 2014).

Segundo o AR5 (IPCC,2014), o aumento das temperaturas médias globais da superfície para 2081–2100 em relação a 1986–2005 é derivado dos modelos de simulações do CMIP5 de acordo com as faixas de concentração consideradas em cada cenários, sendo:

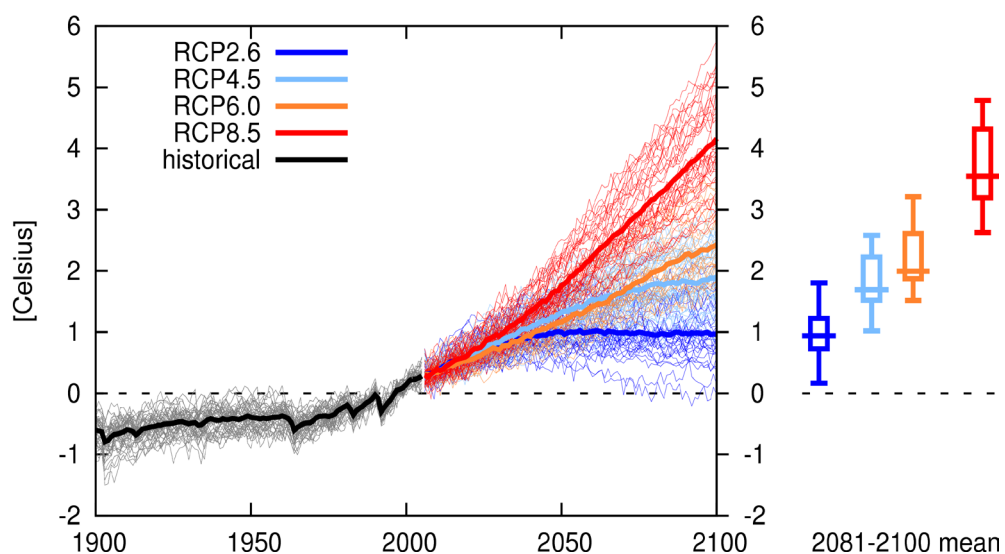
RCP 2.6: cenário de mitigação, faixa de 0.3°C a 1.7°C. Considera uma redução substancial das emissões de gases de efeito estufa ao longo do tempo.

RCP 4.5: cenário de estabilização, faixa de 1.1²C a 2.6°C. A forçante radiativa é estabelecida pouco depois de 2100 sem ultrapassar o limite de 4.5W/m².

RCP 6.0: cenário de estabilização, semelhante ao RC 4.5, contudo a forçante radiativa tem limite de 6.0W/m².

RCP 8.5: cenário extremo de elevadas emissões de gases de efeito estufa, faixa de 2.6°C a 4.8°C. Cenário pessimista caracterizado pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa ao longo do tempo.

Gráfico 5.12 | Aumento estimado da temperatura média de superfície de acordo com os cenários de mudanças climáticas (Fonte IPCC-AR5, 2014)



Quanto aos aumentos de curto prazo nas temperaturas médias sazonais e médias anuais, estes tendem a serem maiores nos trópicos e subtropicais do que nas latitudes médias. A região do Ártico aquecerá mais rapidamente do que a média global, e o aquecimento

médio sobre a terra será maior do que sobre o oceano. Por fim, é estimado que ocorra frequentemente mais calor e menos temperaturas extremas frias na maioria das áreas terrestres em escalas de tempo diárias e sazonais à medida que as temperaturas médias globais aumentam (IPCC, 2014). Em 2022, o IPCC divulgou o Sexto Relatório de Avaliação - AR6, apresentando também cenários futuros, porém não se fez viável o uso deste nesta pesquisa para avaliações computacionais considerando contextos climáticos.

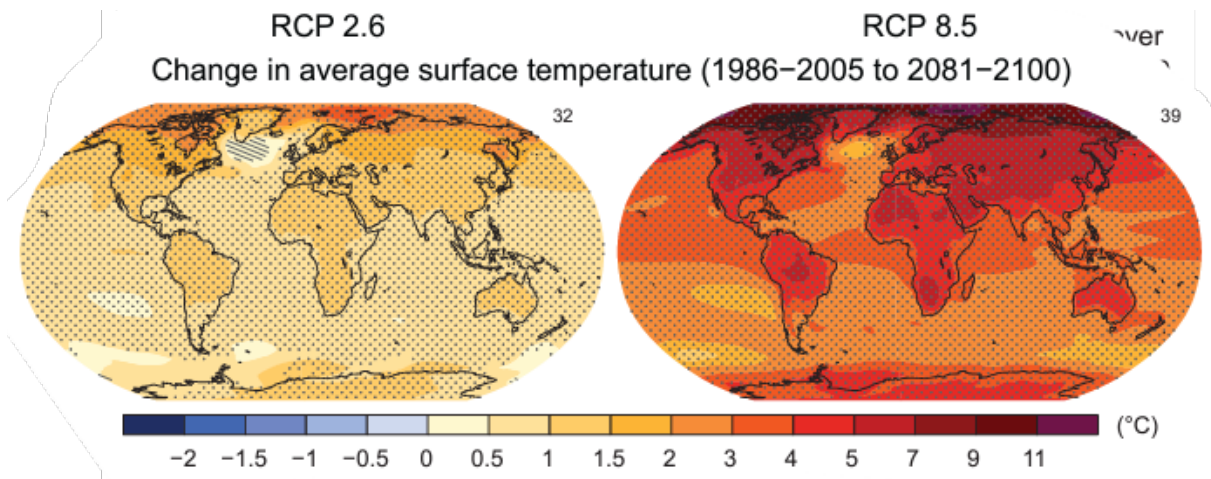
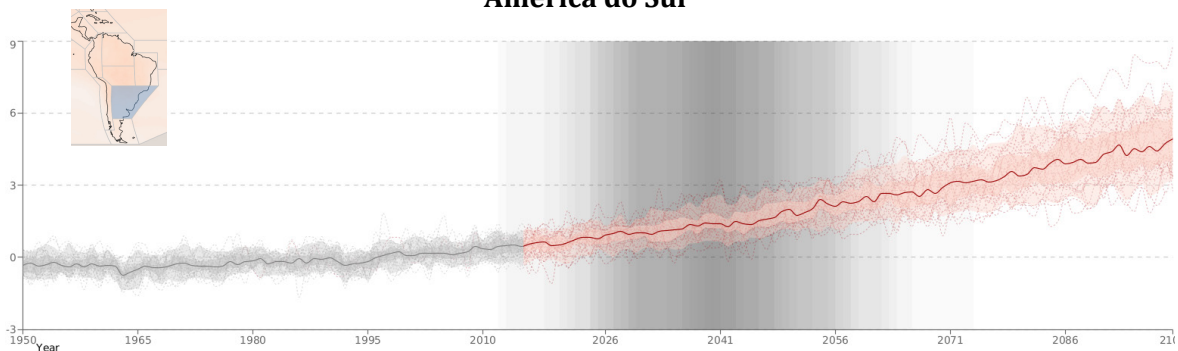


Figura 5.2 | Mudança na temperatura média de superfície | Fonte: IPCC-AR5, 2014

Gráfico 5.13 | Mudança na Temperatura Média para o cenário SSP5-8.5 para região sudeste da América do Sul



Assim, para essa pesquisa se faz oportuno a avaliação de cenários futuros, a fim de averiguar os impactos no desempenho termo-luminoso dos microapartamentos devido às mudanças climáticas. A abordagem para geração de arquivos meteorológicos futuros é baseada em séries temporais de variáveis meteorológicas. A premissa fundamental é preservar a variabilidade hora a hora de cada uma das séries temporais que compõem os arquivos meteorológicos, ao mesmo tempo em que transforma consistentemente os seus valores médios mensais com as projeções climáticas futuras (DICKINSON, 2016). As mudanças nas médias mensais são calculadas para variáveis meteorológicas de cada membro de um conjunto de clima global para um período futuro em comparação com um período de linha de base (DICKINSON, 2016).

Os arquivos climáticos futuros utilizados foram construídos e fornecidos pelo Weather Shift (www.weathershift.com), que é uma plataforma destinada a fornecer acesso a dados

meteorológicos e climáticos futuros projetados (DICKINSON, 2016). Para as avaliações do desempenho considerou-se o cenário pessimista do RPC8.5 para 2030, 2050 e 2080. A seguir apresentam-se os gráficos comparativos dos períodos atuais e futuros RCP8.5 (2030, 2050 e 2080)

Gráfico 5.14 | Curva de Temperaturas máximas e mínimas (TBS) para cenários atual e futuros (RCP8.5).

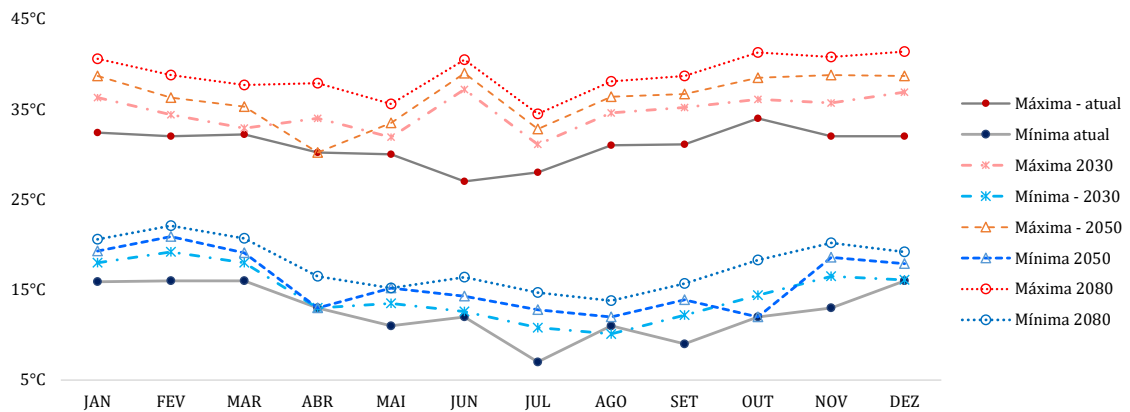


Gráfico 5.16 | Curva de Temperaturas das médias das máximas e das médias das mínimas (TBS) para cenários atual e futuros (RCP8.5).

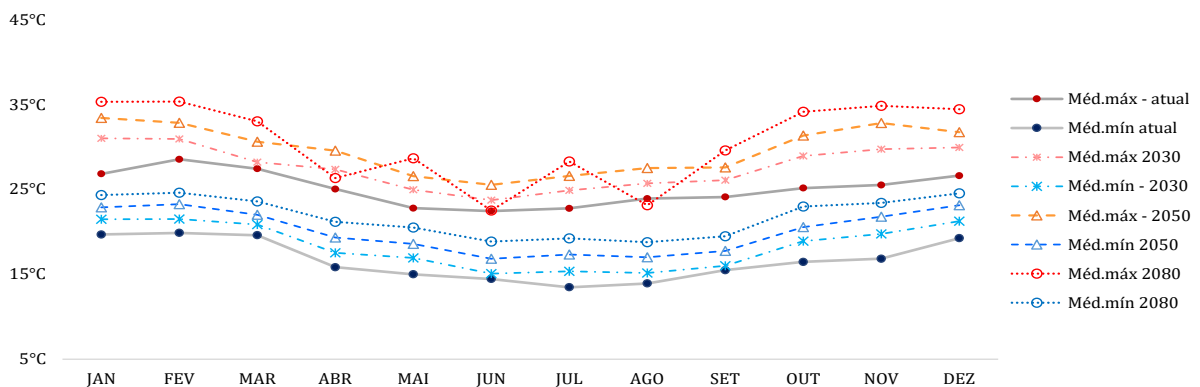
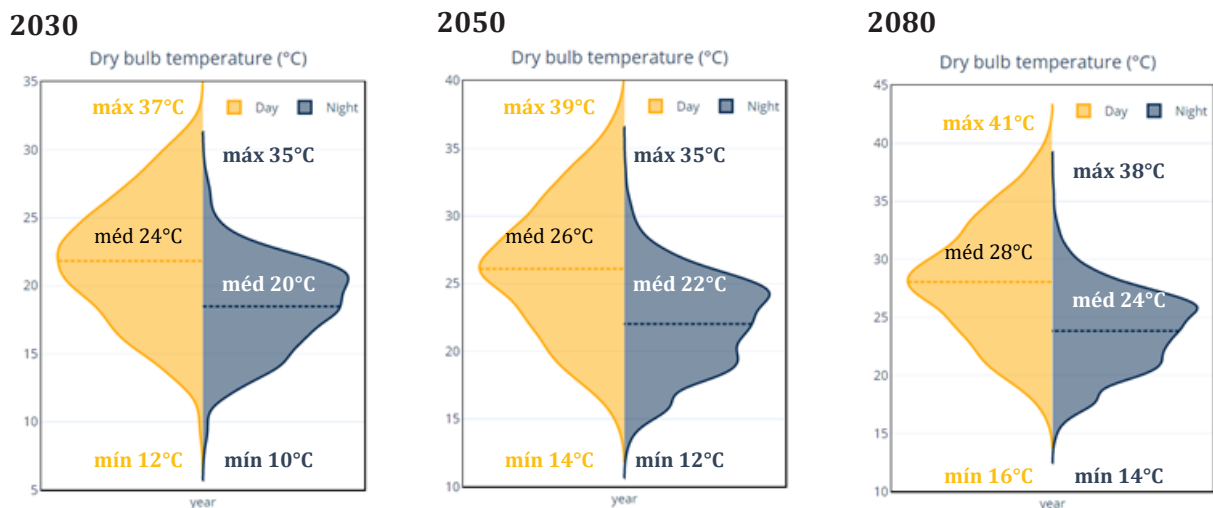


Gráfico 5.15 | Perfis de Temperatura (TBS) para cenários atual e futuros (RCP8.5).



5.3. VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

O objetivo da simulação numérica do desempenho do edifício é recriar a realidade o mais próximo possível, mas devido à complexidade do ambiente construído e à presença de muitas variáveis independentes, por vezes é difícil obter uma representação precisa do desempenho real do edifício (Sarna, 2022). Portanto, os resultados da simulação devem ser validados, sendo a validação uma atividade que visa confirmar os resultados de forma documentada e de acordo com as premissas de que procedimentos, processos, atividades e sistemas levam aos resultados planejados (Sarna, 2022). A validação das simulações é fundamental para execução da etapa de modelagem ao imprimir maior confiabilidade ao modelo e, assim, garantir a extrapolação de cenários diversos. A validação das simulações também atesta a confiabilidade aos testes de sensibilidade para definição das variações de cada parâmetro do modelo.

Segundo Queiroz e Pereira (2020), existem três tipos de procedimentos de validação de software na literatura: analítico, experimental e comparativo. No primeiro tipo, o processo de validação é baseado em referências analíticas. O segundo, utiliza dados reais para a comparação e considera as incertezas do processo de medição para a validação. O terceiro tipo avalia comparativamente os dados de simulação de dois softwares: um validado e outro em revisão (Queiroz e Pereira, 2020). Assim, a validação nessa pesquisa é experimental e foi realizada a partir da comparação entre dados reais e simulados para as avaliações de térmica e iluminação natural. As simulações nessa etapa tiveram por objetivo de atestar a aderência da modelagem a partir da regressão e análises entre os dados coletados nos levantamentos de campo e os dados obtidos nas simulações.

As validações foram conduzidas a partir de simulações com base no arquivo climático do ano de medição e em modelos tridimensionais considerando as características projetuais, físicas e construtivas de 3 estudos de casos. Para melhor controle das variáveis a serem configuradas para o alcance da aderência do modelo optou-se pelos estudos de casos sem ocupação e com mesmo padrão construtivo, sendo estes as unidades (c), (d) e (e). Salienta-se também que a unidade (b) por ser habitada permite a análise mais qualitativa do uso e ocupação da tipologia em estudo, não sendo adequado sua aplicação para aderência e validação do modelo.

5.3.1. SIMULAÇÕES DE TÉRMICA

As simulações dinâmicas termo energéticas foram realizadas no Energyplus (ENERGY LLC-DOE; versão 22.1 - 2020), programa validado pela ASHRAE Standard 140 e amplamente utilizado. O objetivo da validação é verificar a aderência das simulações por meio da correlação entre os dados medidos e os simulados. Por tratar-se de ambientes naturalmente ventilado, foram avaliados diferentes cenários de ventilação a partir de variações dos

parâmetros de ventilação e infiltração, buscam identificar quais dados de entrada do modelo devem ser considerados de forma a minimizar as discrepâncias de resultados.

Como as unidades utilizadas para a aderência das simulações não estavam ocupadas, ou seja, sem carga interna, reduziu-se consideravelmente os dados de entrada permitindo um maior controle das configurações e dos resultados das simulações. Ainda, por possuir mais de um estudo de caso medido, há uma maior confiabilidade na aderência dos resultados, uma vez que estes apresentam diferentes condições de contorno.

a. Programa de Simulação de Térmica | Energyplus

O Energyplus (ENERGY LLC) é um programa de simulação de carga térmica e análise energética desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, a partir de dois outros softwares, o BLAST e o DOE-2, e validado pela ASHRAE Standard 140 (DREW *et al*, 2001). O método de cálculo utilizado pelo Energyplus para avaliação do processo de transferência de calor no edifício é o modelo nodal, baseado nos princípios fundamentais do balanço térmico. A figura 5.3 ilustra a estrutura do Energyplus, identificando os dados de entrada, os cálculos administrados e os dados de saída.

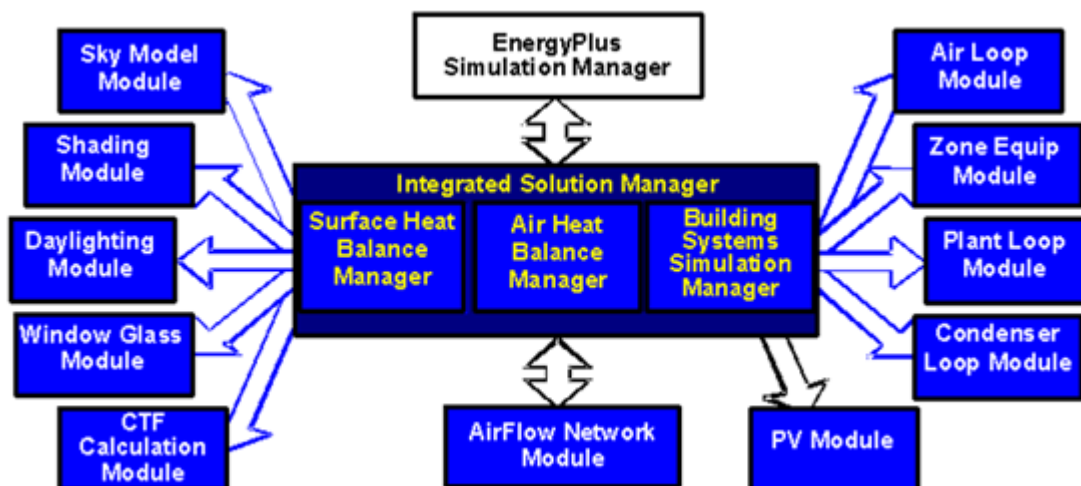


Figura 5.3 | Estrutura do programa Energyplus. | Fonte: Energyplus Handbook, 2020

De acordo com Zhang *et al* (2013), cada zona é assumida com variáveis de estado uniformes de temperatura, pressão e densidade. Coeficientes empíricos são usados para calcular os fluxos de transferência de variáveis de estado entre cada nó (ZHANG *et al*, 2013). No início de cada simulação as temperaturas das zonas e das superfícies são inicializadas com 23°C e a umidade em relação à taxa externa. Esse primeiro dia é repetidamente simulado até as cargas e temperaturas convergirem. Por isso, realizou-se para os estudos de aderência avaliações anuais, para assim minimizar discrepâncias decorrentes das convergências.

Nesta pesquisa, as simulações de desempenho e conforto térmico devem realizar

a adequada avaliação da ventilação natural, fenômeno de difícil modelagem. Segundo Hensen *et al* (2011), a integração adequada dos modelos de ventilação nas ferramentas de Simulação Energética do Edifício (BES) é feita através dos modelos de Airflow Network (AFN), que descrevem uma rede de caminhos do fluxo de ar do exterior através das zonas do edifício, conduzidos por coeficientes de pressão (C_p). Os coeficientes de pressão aplicados a estas simulações foram calculados diretamente no Energyplus a partir do Surface-averaged C_p Calculation. Tal equação permite estimar o coeficiente em cada parede considerando a geometria do edifício e a direção do vento, sendo recomendado para geometrias simplificadas e edifícios retangulares.

Os estudos de caso foram modelados no programa Rhinoceros 3D (ROBERT MCNEEL, 2020) e para simulação energética no Energyplus foi utilizado o plugin Ladybug/ Honeybee (LADYBUG TOOLS, 2020). O período de simulação considerado foi do dia 06 de março a 26 de março e do dia 11 de agosto a 31 de agosto, totalizando 974 horas simuladas. A tabela 5.1 apresenta as configurações dos dados de entrada tanto em relação às características termo físicas dos materiais, quanto aos controles de simulação.

Tabela 5.1 | Parâmetros de entrada configurados para as simulações no energyplus

Propriedades Termofísicas					
	$U_{\text{superficial}}^*$ (W/m ² -K)	α (Absortância)/ ρ : Refletância Solar		U- (W/m ² -K)	Fator Solar (F.S)
Alvenaria Externa	2.38	α : 0.4	Vidro	5.70	0.86
Alvenaria Interna	1.89	α : 0.2			
Laje de Cobertura	2.77	α : 0.65			
Entre-piso	2.13	α : 0.65			
Entorno	-	ρ : 0.35			
Sombreamento	-	ρ : 0.60			

Propriedades da Simulação			
Versão	22.1	AirFlow Network	<i>MultizoneWithDistribution</i>
Arquivo Climático	<i>Ano de referência da Medição</i>	Coeficiente de pressão (C_p)	<i>SurfaceAverageCalculation</i>
Time step	6	Tipo de Edifício	<i>LowRise</i>
Solar Distribution	<i>FullInteriorAndExteriorWithReflections</i>		
Terrain	<i>City (cidade)</i>		

* Considera as resistências de ar superficiais no cálculo da Transmitância (U).

Para os estudos de aderência das simulações energéticas foram configurados sete cenários quanto aos parâmetros de ventilação natural, conforme descrito na tabela 5.2. Dessa forma, foi possível compreender a correlação da parametrização dos cálculos e variáveis relacionadas a ventilação natural e seu efeito na temperatura de ar interna e no valor de renovação de ar por hora (ACH). Para maior controle dos estudos foi alterado apenas as variáveis apresentadas na tabela 5.2, os demais dados de entrada continuaram semelhantes a todos os cenários.

Tabela 5.2 | Configurações dos Cenários dos Estudos de Aderência

Cenários de Ventilação Natural				
Cenários	Infiltração		Ventilação pelas aberturas**	
			(% da área das esquadrias aberta para ventilação)	
INFIL.0	Flow/ExteriorArea	0.0001 m ³ /s-m ²	Sem Ventilação	0%
INFIL.3	Flow/ExteriorArea	0.0003 m ³ /s-m ²	Sem Ventilação	0%
INFIL.6	Flow/ExteriorArea	0.0006 m ³ /s-m ²	Sem Ventilação	0%
VN-5	Air MassFlow Coefficient	0.0024 kg/s-m	AirFlow Network	5% aberto
VN-10	Air MassFlow Coefficient	0.0024 kg/s-m	AirFlow Network	10% aberto
VN-30	Air MassFlow Coefficient	0.0024 kg/s-m	AirFlow Network	30% aberto
VN-50	Air MassFlow Coefficient	0.0024 kg/s-m	AirFlow Network	50% aberto

** Considerando o acionamento das aberturas (abrir e fechar) de acordo com a abertura das esquadrias nos levantamentos de campo.

b. Discussão dos Resultados de Térmica

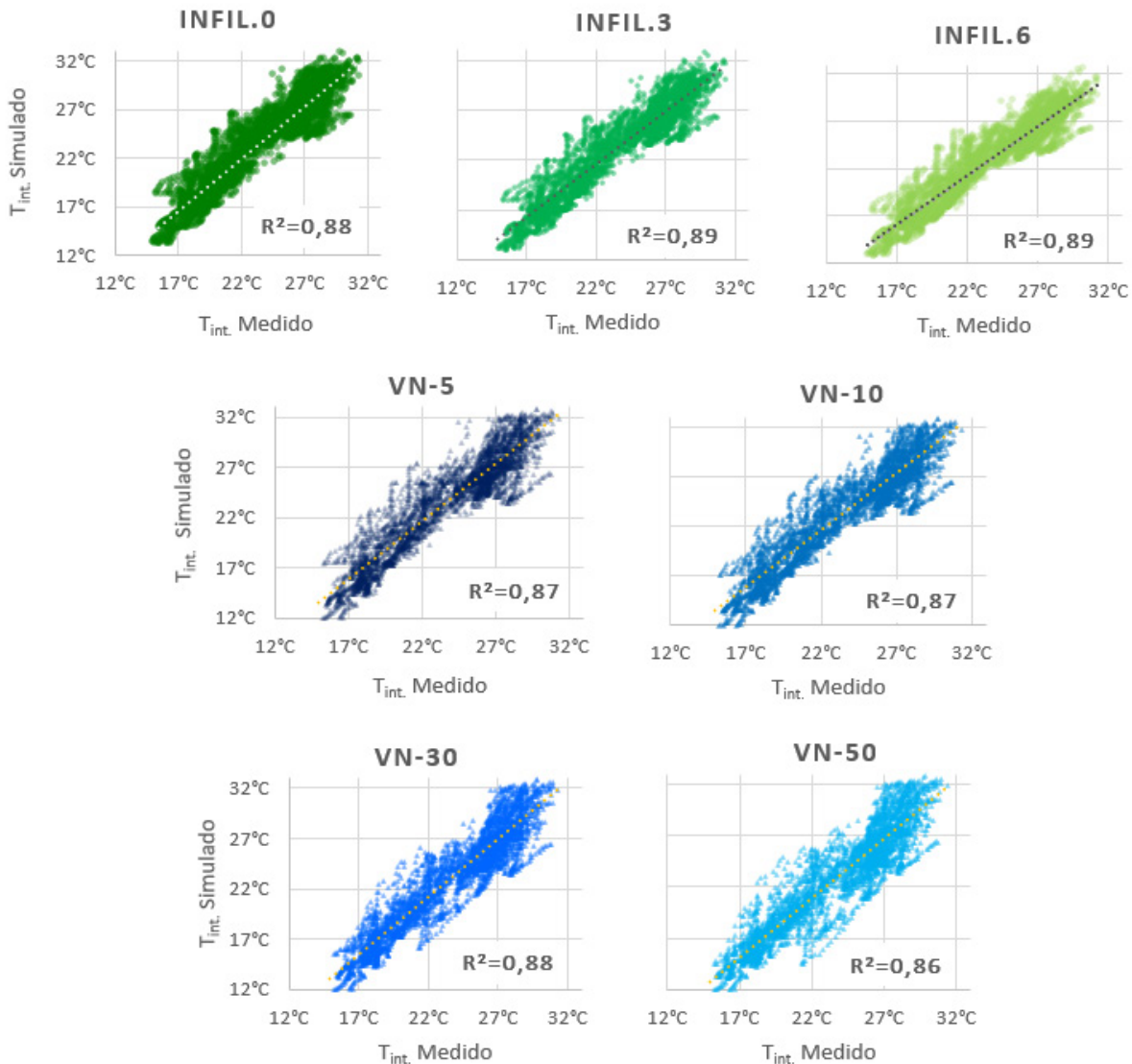
Foram realizados 70 estudos de aderência, organizados em 7 cenários de ventilação, conforme explicitado na tabela 5.2. As aberturas das esquadrias seguiram os períodos dos levantamentos, ou seja, de 20 a 26 de março e de 23 a 31 de agosto as esquadrias permaneceram abertas tanto na medição, quanto na simulação. Os resultados obtidos indicaram uma elevada correlação entre os dados de temperaturas de ar internas simulados e os coletados (reais medidos) das unidades (c), (d) e (e). Para uma compreensão do efeito das configurações estudadas das simulações, foram realizadas de regressões dos dados de temperatura de ar interna em quatro conjuntos de amostras:

- i. Total*: amostra constituída do total de dados obtidos (3936), sem separação por tipo de unidade, período ou condição de ventilação.
- ii. Total-Aberta*: amostra constituída por todas as unidades considerando apenas o período em que a esquadria permaneceu aberta (1192).
- iii. Unidades*: amostra constituída por cada tipo de unidade considerando o período inteiro de medição (984 por unidade).
- iv. Unidades Abertas*: amostra constituída por cada tipo de unidade considerando apenas o período com ventilação a esquadria aberta (384 por unidade).

A análise das correlações entre as temperaturas de ar internas (T_{int}) medidas e simuladas considerando as regressões da amostra total indicou uma elevada aderência das simulações, com R²ajustado acima de 0.85, sendo o maior valor 0.89 nos cenários INFIL 3 e 6, e o menor é o 0.86 no cenário VN-50. Como as regressões apresentaram correlações bastante semelhantes, para uma compreensão mais holística das simulações e definição de qual configuração de ventilação melhor representa as condições reais realizou-se outras análises de dados.

Assim como os gráficos de dispersão (5.17), o gráfico de Erros erros (5.18) também indicou um aumento dos extremos de temperaturas nos cenários de ventilação natural

Gráfico 5.17 | Gráficos de Dispersão por cenário, considerando a amostra total (amostra de 3936 dados coletados)



(VN). No gráfico 5.18 é possível observar os extremos e a distribuição para cada cenário estudado. Quando as esquadrias são operadas a mínima simulada é de 11.6°C (e) e a medida de 15°C (e), a máxima simulada é de 33.8°C (d) e medida de 31.3°C. Percebe-se que apesar dos cenários com abertura das esquadrias (VNs) apresentarem os maiores extremos de máximas e de mínimas, as distribuições dos cenários VN-5 e VN-10 estão mais aderentes aos dados medidos, ao lado do cenário INFIL.0. Dessa forma, afirma-se o impacto das aberturas nas configurações das temperaturas internas, principalmente quando as estas ocorrem em momentos mais críticos das condições externas (temperatura de ar e velocidade de ar).

A comparação entre o período inteiro e o período aberto, em que as esquadrias permaneceram abertas, permite avaliar com maior acuidade o efeito da ventilação e da infiltração nas temperaturas de ar internas. Na tabela 5.3 é possível averiguar numericamente a elevada correlação dos cenários avaliados, sendo 95% das 70 regressões realizadas acima de 0.80 e 30% acima de 0.90. As simulações por AFN representaram o efeito da ventilação

cruzada de forma bastante fidedigna a realidade, conforme demonstrado na tabela 5.3 em que as melhores aderências dos dados ocorreram nos cenários com 30% e 50% de abertura das esquadrias simuladas (VN-30 e VN-50).

Gráfico 5.18 | Gráfico de erros da amostra total (máximas, mínimas e distribuição de 95%).

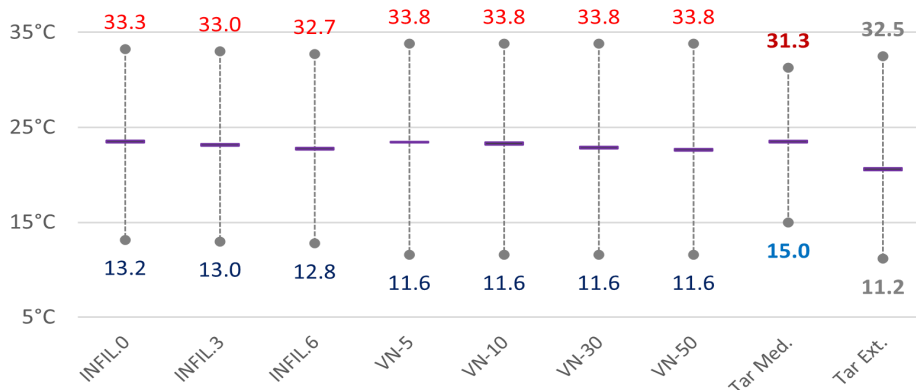


Tabela 5.3 | Regressão entre as temperaturas de ar internas simuladas e medidas (R²)

CENÁRIOS	Todas*		(C)		(E)		(Dinf)		(Dsup)	
	Inteiro	Aberto	Inteiro	Aberto	Inteiro	Aberto	Inteiro	Aberto	Inteiro	Aberto
INFIL0	0.88	0.86	0.92	0.89	0.88	0.85	0.84	0.81	0.92	0.92
INFIL3	0.88	0.87	0.92	0.90	0.89	0.87	0.85	0.82	0.93	0.93
INFIL6	0.89	0.89	0.93	0.92	0.89	0.88	0.85	0.82	0.93	0.93
VN-5	0.87	0.84	0.93	0.86	0.87	0.82	0.82	0.77	0.91	0.91
VN-10	0.87	0.84	0.93	0.87	0.88	0.83	0.83	0.77	0.91	0.91
VN-30	0.88	0.81	0.95	0.87	0.91	0.88	0.83	0.71	0.89	0.81
VN-50	0.86	0.73	0.88	0.80	0.91	0.86	0.80	0.62	0.85	0.67

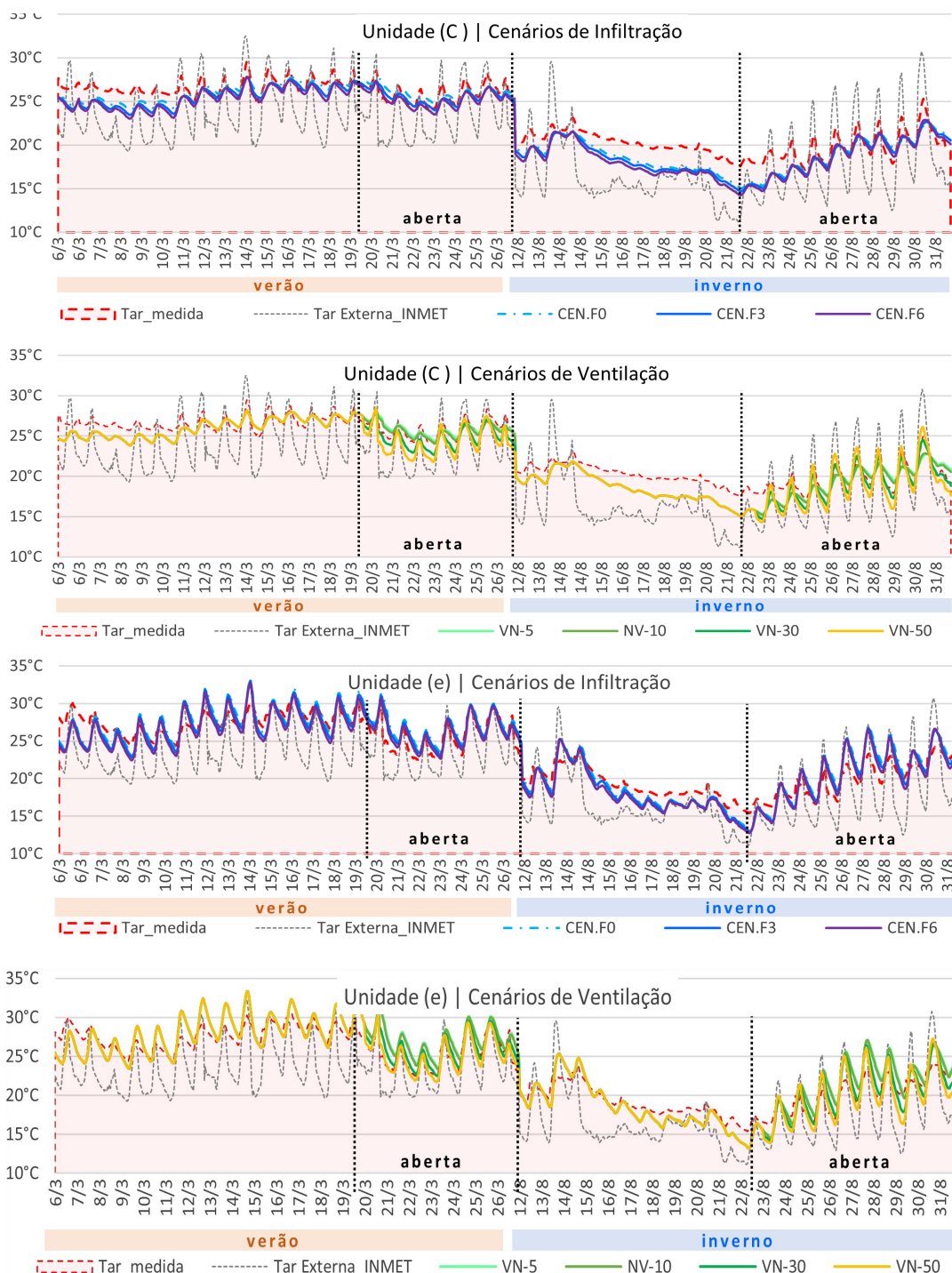
Apresenta-se na tabela 5.3 as taxas de renovação de ar para cada cenário de ventilação natural (AFN). Nestes, além das infiltrações, também se modelou as aberturas das esquadrias o que afeta significativamente as taxas de renovação do ar interno. Observa-se a tendência das simulações energéticas de superestimarem as renovações de ar internas quando se modela a ventilação natural. No entanto, os resultados demonstraram que ao considerar as avaliações da ventilação natural através do Airflow Network (AFN) tal efeito é atenuado, uma vez que a taxa média de renovação para o cenário com maior percentual de abertura é de aproximadamente 7ACH.

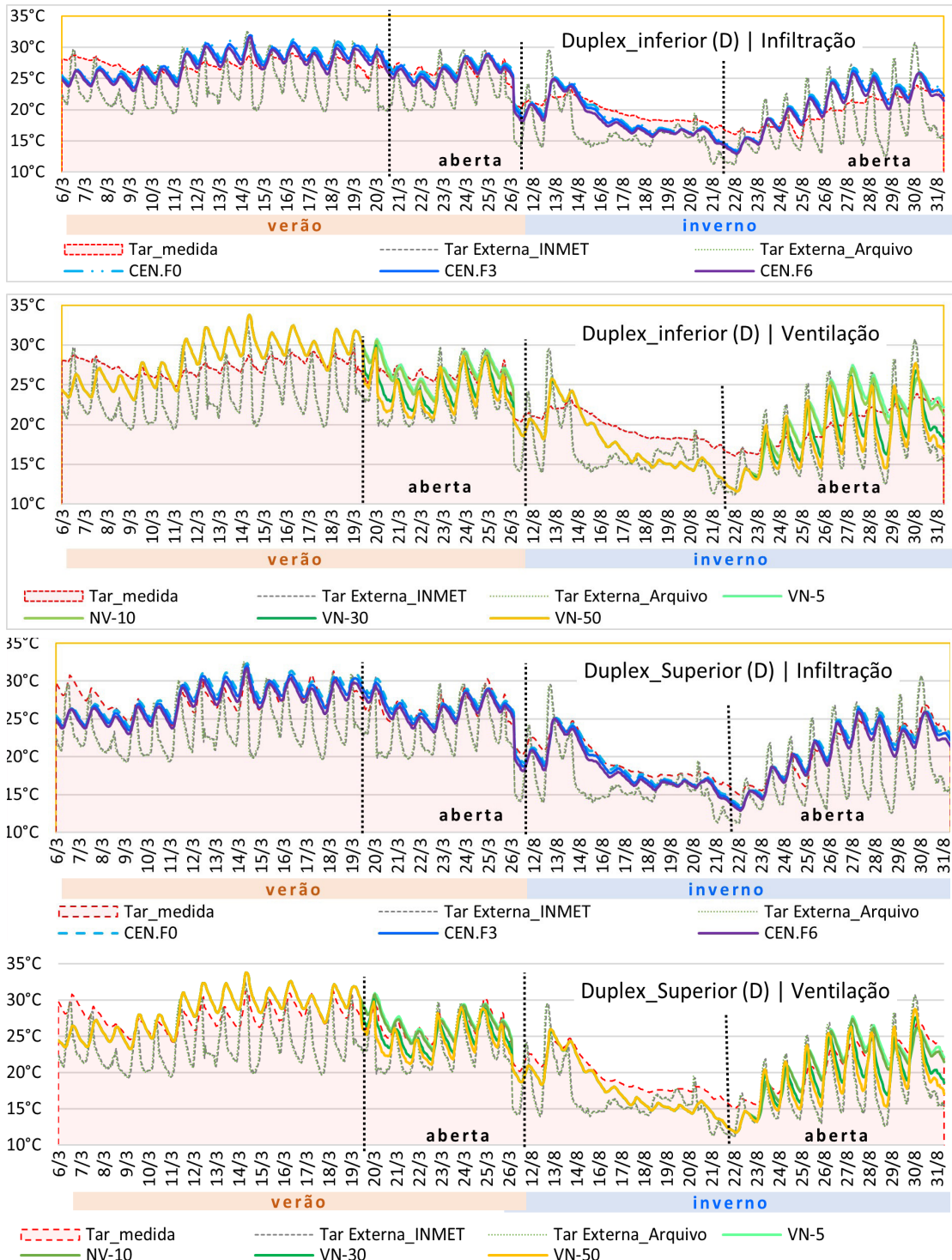
Tabela 5.4 | Taxas de Renovação do Ar por hora (ACH) – apenas no período com abertura

Taxas de renovações de ar por hora (ACH) para cada unidade proveniente da abertura das esquadrias									
AFN		(C)		(E)		(Dinf)		(Dsup)	
		Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média
VERÃO	VN-5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.6	0.3	0.9	0.1
	VN-10	0.6	0.3	0.4	0.1	2.3	1.2	3.6	0.5
	VN-30	4.6	2.9	3.2	1.1	16.5	7.3	27.8	5.3
	VN-50	10.8	7.1	7.9	2.5	34.3	15.2	65.6	14.1
INVERNO	VN-5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.7	0.4	1.2	0.1
	VN-10	0.7	0.4	0.3	0.1	2.5	1.4	4.2	0.4
	VN-30	5.1	3.5	2.1	1.0	16.5	9.0	34.9	5.8
	VN-50	12.6	8.5	5.6	2.1	35.2	19.0	82.5	15.3

Durante o período de medição com as esquadrias abertas foram registradas baixas velocidades de ar internas (média abaixo de 0.2 m/s), sendo mais significativo apenas na unidade (e) devido à ventilação cruzada. O entendimento do impacto do movimento de ar devido à abertura das esquadrias nas temperaturas de ar internas é percebido por meio dos perfis de temperatura. Nos gráficos 5.19, as curvas de temperaturas de cada o cenário são apresentadas juntamente com as de temperatura externa e a medida.

Gráfico 5.19 | Gráficos das curvas de temperatura de ar interna para cada unidade.





Apesar das baixas velocidades observadas nas medições, os perfis de temperaturas evidenciam o aumento da amplitude térmica quando as esquadrias permanecem abertas, influenciadas pelas oscilações da movimentação de ar, seja devido à ação do vento ou à troca direta com ar externo. Tal comportamento é mais bem representado nas simulações de AFN, uma vez que estas consideraram percentuais de abertura das esquadrias e não apenas as taxas de infiltração.

5.3.2. SIMULAÇÕES DE ILUMINAÇÃO NATURAL

As simulações de Iluminação Natural foram realizadas em programa computacional validado, o Daysim/ Radiance e os estudos de aderência serviram para ajustar os parâmetros de entradas imprimindo maior confiabilidade ao modelo. A validação da iluminação natural dessa pesquisa é experimental, onde se compara dados coletados em ambientes reais com os simulados. Busca-se entender aqui se resultados estão posicionados de forma semelhante em ambos os conjuntos (QUEIROZ e PEREIRA, 2020). Nesse caso, o resultado numérico não é necessariamente a preocupação principal, mas a similaridade entre o comportamento real e simulado da iluminação natural.

Ainda, deve-se ponderar algumas incertezas do processo de medição da iluminação natural e da construção do arquivo climático do ano de medição na validação das simulações.

a. Aderência da Radiação do arquivo do ano de medição: O cálculo de radiação do arquivo climático do ano de medição foi realizado por meio de dados da radiação da estação automática INMET e de índices de nebulosidade do arquivo climático de base, o TMY 2004-2018. Assim, a aderência entre a radiação coletada pelo INMET e pelo arquivo de medição resultou num R^2 de 0.825 o que implica menor aderência entre os dados simulados e reais da iluminação natural.

b. Iluminâncias externas: As condições de céu são bastante dinâmicas devido à elevada mutabilidade das nuvens. Dessa forma, como os dados reais considerados são da estação meteorológica e não dos valores de iluminância externas in loco, deve-se considerar variações relevantes entre os dados das condições de céu que influenciam instantaneamente a disponibilidade da luz natural no interior dos ambientes.

Portanto, o que se buscou nas análises das simulações da iluminação natural foi verificar a correlação dessa variável ambiental no cenário real e no simulado, entendendo o impacto dos parâmetros de entrada nos resultados das simulações.

a. Programa de Simulação de Iluminação | Daysim/ Radiance

O programa utilizado para as simulações de iluminação natural foi o daysim/ radiance, software desenvolvido pelo National Research Council Canada (NRCC) e o Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems na Alemanha. É um programa altamente validado, em 1995 Mardaljevic validou com sucesso o Radiance para um conjunto de medições de céu claro e nublado e em 2001, o autor estendeu o trabalho para validar o Radiance através do conjunto de dados BRE de condições de teste.

Tal programa simula a iluminação natural por meio de coeficientes de iluminação baseados em radiância utilizando o método de rastreamento de raios (Ray tracing) e os modelos de céu desenvolvidos por Perez *et al* (1990). A simulação é baseada no modelo

tridimensional que descreve a geometria, as características das superfícies e as propriedades ópticas (QUEIROZ e PEREIRA, 2020). Segundo Queiroz e Pereira (2020), o método de rastreamento de raios simula raios de luz individuais e representativos em uma cena modelada digitalmente e extrapola a distribuição global de luz disponível na cena a partir da interação com as superfícies. O feixe de luz geralmente é interrompido quando um certo número de reflexões é atingido ou se o peso relativo de uma proporção cai abaixo de um determinado valor limite (REINHART, 2011).

Os estudos de caso foram modelados no programa Rhinoceros 3D (www.rhino3d.com) e para simulação do Radiance (windows.lbl.gov/software/radiance) foi utilizado o plugin Ladybug/ Honeybee (www.ladybug.tools). O período de simulação considerado foi do dia 06 de março a 26 de março e do dia 11 de agosto a 31 de agosto, das 7 horas às 18 horas, totalizando 504 horas simuladas. A tabela 5.5 apresenta as configurações das características das superfícies e ópticas dos materiais que foram definidas seguindo as especificações dos acabamentos e com embasamento na pesquisa de Dornelles, 2008 em relação às refletâncias das cores e INMETRO anexo V para as transmissões visíveis. Por último, as acuidades das simulações são estabelecidas a partir das configurações dos parâmetros Radiance, em que nesse trabalho seguiram as seguintes configurações:

-aa 0.2; -ab 8; -ad 1024; ar 256; -as 256; -dj 0; -dr 2; -ds 0.2; -lr 6; -lw 0.004; -st 0.15; -ss 1.

Tabela 5.5 | Parâmetros de entrada configurados para as simulações no Daysim e Radiance

Superfícies	Parâmetros de Entrada – Geometria	
	Especificação	Refletância/ Transmissão visível
1. Piso	<i>Contrapiso</i>	<i>0,35</i>
2. Piso Externo	<i>Cerâmica Clara</i>	<i>0,45</i>
3. Paredes Internas	<i>Tinta fosca Branca</i>	<i>0,75</i>
4. Paredes Externas	<i>Argamassa cor clara</i>	<i>0,6</i>
5. Teto	<i>Tinta fosca Branca</i>	<i>0,85</i>
6. Entorno	<i>Entorno padrão</i>	<i>0,35</i>
7. Solo	<i>Conforme Reinhart</i>	<i>0,25</i>
8. Caixilho	<i>Alumínio cor clara</i>	<i>0,80</i>
9. Vidro	<i>Vidro 4mm clear</i>	<i>Trans. Vis: 89%</i>



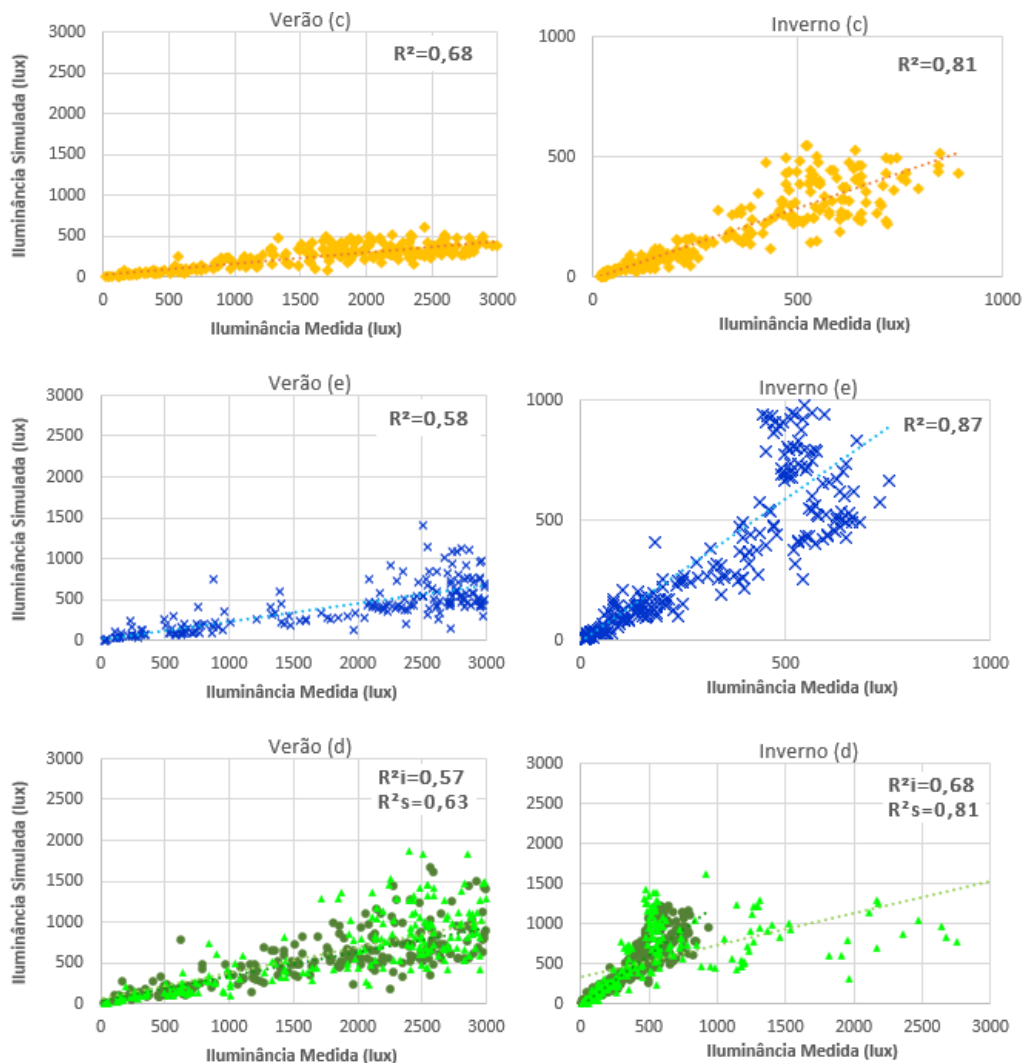
Figura 5.4 | Modelo tridimensional para simulação de iluminação natural pelo Radiance/Daysim. | Fonte: autoral

b. Discussão dos Resultados de Iluminação

A CIE estimou que uma faixa aceitável de precisão seria de 10% para cálculos de iluminância média, 20% para valores pontuais medidos (FISHER 1992), sendo muito difícil o alcance de 5% em situações complexas. O valor de 20% tem ocorrido em estudos que replicam realidades construídas e foi validado por Reinhart e Andersen (2006) em casos reais. Galasiu e Atif (2002) relatam até 20% de variação entre valores simulados e medidos em ambientes fechados, mas diferenças maiores para áreas sob sol direto. Nesse sentido, andares mais altos tendem a apresentar resultados com menor precisão por estarem mais expostos a luz direta.

Considerando as incertezas citadas nas medições e nas premissas de simulação, os resultados obtidos apresentaram uma faixa de precisão razoável com 33.7% de variação média global, sendo 19.9% na unidade (c), localizada no andar mais baixo. Os gráficos 5.20 de dispersão permitem observar a correlação entre os dados medidos e simulados, separado em verão e inverno para cada estudo de caso. Observa-se uma tendência de os valores simulados serem inferiores aos medidos.

Gráfico 5.20 | Gráficos de dispersão entre Iluminâncias medidas x simuladas.



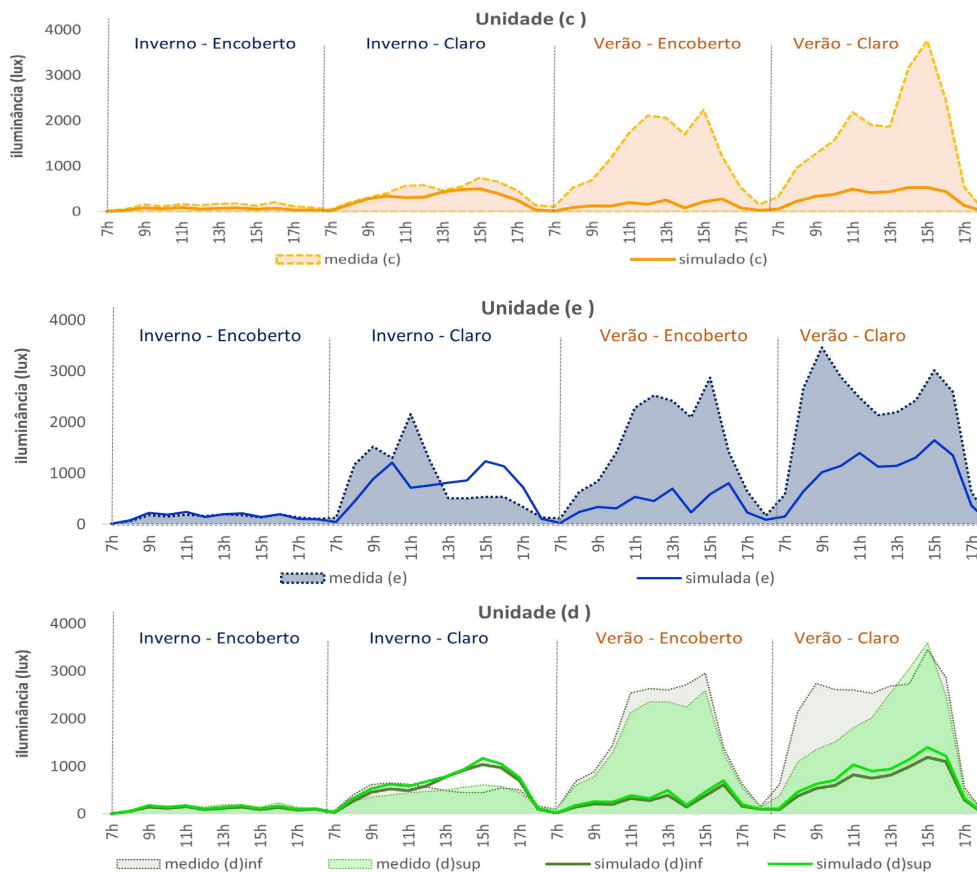
A unidade (c), em que a geometria é a mais simplificada, apresentou $R^2=0.68$ no verão e $R^2=0.81$ no inverno. O menor R^2 encontrado foi de 0.57, no piso inferior da unidade (d) durante o verão, e o maior, $R^2=0.87$, na unidade (e) durante o inverno. Os resultados apontaram uma menor correlação durante o período de verão, onde há maior variação da nebulosidade e, portanto, uma intensificação do efeito das incertezas das medições. Ainda, as simulações desse período reforçam a tendência de valores simulados inferiores aos verificados nas medições.

Foram analisados também as iluminâncias úteis da luz do dia (UDI 300lux-3000lux) entre os dados simulados e medidos. Por essa métrica de avaliação a diferença entre os resultados é menor, com desvio padrão

Unidades	UDI – Iluminâncias Úteis (300 – 3000lux)		
	medido	simulado	Desvio padrão
Unidade (c)	66.4%	63.2%	2.3%
Unidade (d)inf	58.3%	58.2%	1.7%
Unidade (d)sup	65.3%	62.9%	1.8%
Unidade (e)	63.5%	66.1%	2.0%

aproximado de 2% conforme tabela 5.6. Para compreensão do comportamento da luz natural de forma comparativa, construiu-se os gráficos 5.21 com as curvas diárias da luz natural para os dias típicos de verão e inverno, com céu claro e céu encoberto. Nestes, evidencia-se a similaridade dos dados, demonstrando a elevada capacidade de simulações baseadas no clima em representar o desempenho da iluminação natural, em especial com arquivos do ano de medição

Gráfico 5.21 | Curvas diárias da luz natural para os dias típicos de verão e inverno.



Contudo no período de verão os dados simulados tendem a ser inferiores aos coletados., conforme foi citado a maior dificuldade de representação de situações com elevada exposição à luz direta (GALASIU e ATIF, 2002). Não obstante, na unidade (c) em que há maior interferência do entorno a discrepância nos dias típicos de verão foram mais relevantes que nos demais casos, inclusive com a curva das simulações mais achatada do que a dos dados medidos.

5.3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos apresentados indicaram a aderência entre os resultados simulados e os medidos, indicando assim a validade das simulações. Ainda, foi possível averiguar as configurações de dados e parâmetros de entrada das simulações de iluminação natural e térmica mais adequadas a serem aplicadas no modelo parametrizado.

A tipologia “duplex”, representada pela unidade (d), foi utilizada para atestar a aderência e as configurações de simulações mais adequadas, no entanto estas não serão consideradas no modelo parametrizado, por sua baixa representatividade nos atuais microapartamentos. Não obstante, a singularidade da unidade (d) é a composição de dois pavimentos, que teve seus resultados indicando a maior influência das soluções arquitetônicas (volume, área de piso e área de fachada exposta) de cada pavimento no desempenho termo-luminoso, do que da interligação entre eles. Portanto, a modelagem parametrizada das soluções arquitetônicas referentes a unidade (c) já é uma representação individual de cada pavimento que compõem a tipologia duplex, sendo avaliações satisfatória em etapas de concepção de projeto.

Contudo, a unidade (e) apresenta diferenciações de soluções de projeto que afetam significativamente seu desempenho, como descrito nos estudos apresentados. Assim, para a etapa de modelagem foi considerado duas tipologias de microapartamentos: 1. com apenas uma abertura e 2. com duas aberturas localizadas em superfícies opostas. Tal arranjo afeta tanto a iluminação natural, quanto a térmica por proporcionar a ventilação cruzada.

Nesse sentido, para as configurações de térmica foi definido a aplicação de simulações por meio do Airflow Network considerando 30% do percentual de abertura da esquadria, cujo resultados demonstraram maior aderência, R^2 ajustado 0.95 na unidade (c) e 0.91 na unidade (e). Em relação à iluminação natural, foi atestado o uso do cálculo de céu de Perez utilizado no Radiance e a validação das configurações dos parâmetros do Radiance aplicados nos estudos de aderências explicitados no item 5.4.1.

5.4. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE LOCAL

A modelagem computacional tornou-se uma atividade chave na construção civil cujo poder computacional disponível tem resultado no desenvolvimento de modelos de simulação ambiental altamente detalhados e complexos. Neste contexto, a complexidade é refletida pelo número de parâmetros que um modelo incorpora como entrada em que o aumento desse número é acompanhado de um crescimento exponencial do custo e do tempo computacional (DOUGLAS-SMITH *et al*, 2020).

O incremento da complexidade tem evidenciado a questão da identificabilidade do modelo, ao reconhecer a importância de se compreender as contribuições dos parâmetros de entrada em relação ao desempenho e ao propósito da simulação (GUILLAUME *et al*, 2019; DOUGLAS-SMITH *et al*, 2020). Nesse sentido, as análises de sensibilidade contribuem ao adequado desenvolvimento do modelo ao investigar as relações entre os parâmetros de entrada e os dados de saída de um modelo de simulação (NORTHON, 2015). Tais análises referem-se também aos métodos e abordagens aplicados que irão auxiliar no entendimento da importância relativa de cada parâmetro de entrada dentro de um determinado contexto (DOUGLAS-SMITH *et al*, 2020).

Ao identificar quais são os parâmetros mais importantes e se precisam de refinamento, é possível simplificar ou até mesmo suprimir as partes com pouca influência nos dados de saída abarcados (NORTHON, 2015). Logo, por meio da identificabilidade, as análises de sensibilidade imprimem credibilidade e utilidade ao modelo de simulação ambiental, uma vez que demonstram a qualidade da estrutura do modelo e das estimativas dos parâmetros, além de identificar onde o modelo pode ser melhorado (NORTHON, 2015).

5.4.1. TÉCNICA DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Há muitas técnicas de análises de sensibilidade, ou seja, diversas maneiras de variar os valores dos parâmetros e examinar seus efeitos nos dados de saídas. Duas possibilidades são as análises de sensibilidade Locais, em que se examina os resultados de um conjunto relativamente pequeno de parâmetros e amostras de saída, onde estes sejam representativos, e as análises Globais, em que se avalia o modelo algebricamente (NORTHON, 2015). Os métodos locais são os mais utilizados e ancorados em torno de um ponto específico no espaço de parâmetros com análises envolvendo comparações com uma saída conhecida de “baseline” (RAZAVI e GUPTA, 2015).

Ambas as análises serão aplicadas nessa pesquisa, porém, com objetivos diferentes e em fases distintas. Nessa fase da pesquisa (pré-modelagem), serão aplicadas as análises de sensibilidade locais com o objetivo de definir uma primeira faixa de variação de cada parâmetro de entrada a ser incorporado no modelo parametrizado. As análises

de sensibilidade locais não irão investigar as relevâncias, interações e incertezas dos parâmetros de entrada. Tal investigação será realizada na fase de pós-modelagem por meio de análises de sensibilidade Globais, sendo descrita detalhadamente no capítulo 7. Ainda, a definição de quais parâmetros serão incorporados a modelagem parametrizada foi baseada nas premissas construtivas e geométricas inerentes ao projeto arquitetônico em etapa de concepção.

Para as análises de sensibilidade local optou-se pela abordagem OAT (one-at-time) em que se altera o valor de um único fator de parâmetro por vez (referido como “perturbador”), mantendo todos os outros parâmetros constantes em seus valores nominais e atribuindo as alterações na saída ao fator que foi modificado. (Douglas-Smith *et al*, 2020). Por fim, organizaram-se as análises de sensibilidade locais em quatro partes: modelo base, cenários, análises de sensibilidade de térmica e análises de sensibilidade luminosa.

5.4.1.1. MODELO BASE

Estabeleceu-se um modelo base para a avaliação comparativa dos resultados, sendo este representativo de uma unidade padrão de microapartamento. As configurações dos parâmetros de entrada do modelo base foram definidos a partir das soluções geométricas e construtivas dos levantamentos de campo. A geometria do modelo base é semelhante ao estudo de caso (c) e seguiu as dimensões apresentadas por Leme e Monteiro (2016) em seu levantamento acerca da recente produção de microapartamentos paulistanas. De acordo com os autores, a atual tipologia de microapartamento é caracterizada por unidades com aproximadamente 20m² de área interna e pé-direito de 2.6m. A tabela 5.7 consolida as características geométricas do modelo base e a figura 5.5 ilustra o modelo tridimensional.

Tabela 5.7 | Características geométrica do Modelo Base

Parâmetros	Configurações Base	Parâmetros	Configurações Base
Orientação	Norte	Quantidade de Aberturas	1 abertura
Área de piso	20m ²	Dimensão das Aberturas	2,4m (altura) x 4,3m (largura)
Pé-direito	2.6m	% área de vidro (WWR)	80% da área de fachada
Planta	4m (prof.) x 5m (compr.)	Sombreamento	Vertical e horizontal com 1m de profundidade.
Faces expostas	Fachada frontal e cobertura		

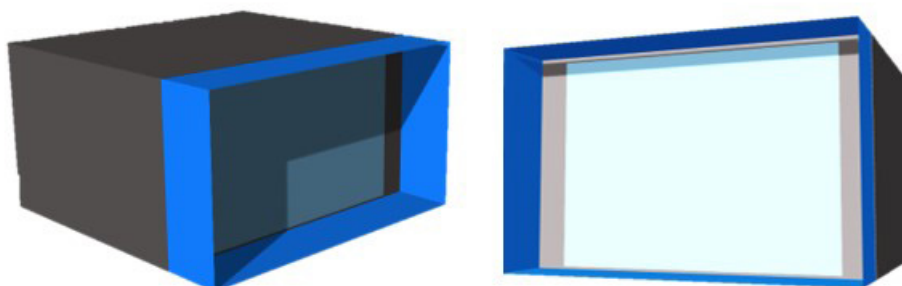


Figura 5.5 | Modelo base tridimensional de simulação para análises de sensibilidade. | Fonte: autoral

Além das características geométricas, também foram detalhados os parâmetros de entrada: perfil de ocupação, construtivos e controles de simulação, conforme descrito na tabela 5.8. A configuração do perfil de ocupação baseou-se no Regulamento Técnico da Qualidade - INMETRO (RTQ-R, 2012) para os períodos de ocupação, quantidade de pessoas e cargas internas. Os controles de simulação e construtivos seguiram as configurações validadas na aderência das simulações

Tabela 5.8 | Parâmetros de Entrada do Modelo Base

Perfil de Ocupação e Carga		Controles de Simulação	
Parâmetros	Configurações Base	Parâmetros	Configurações Base
Período de ocupação	RTQ - misto	Arquivo Climático	BRA_SP_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800_TMY
Número de Pessoas	0.1 pes/m ²	Infiltração	0.0003 m ³ /s-m ²
Taxa Metabólica	81W	Programa - Térmica	Energyplus 9.2.1
Iluminação	5W/m ²	Programa - Luminoso	Radiance/ Daysim
Equipamentos	120 W		
Configuração Construtivas - Luminoso		Configuração Construtivas - Térmica	
Parâmetros	ρ : Refletância Solar	Parâmetros	$U_{\text{superficial}}^*$ (W/m ² -K)
Alvenaria Externa	0.6	Alvenaria Externa	2.38
Alvenaria Interna	0.7	Alvenaria Interna	1.89
Teto	0.8	Laje de Cobertura	2.77
Piso	0.35	Entre-piso	2.13
Entorno	0.35		
Parâmetro	Trans. Visível	U- (W/m ² -K)	Fator Solar (F.S)
Vidro	87%	5.70	0.86

Em relação à ventilação, como a modelagem das configurações de ventilação já foi definida a partir da validação das simulações, optou-se por suprimir o efeito da ventilação natural nessa etapa e considerar apenas a infiltração. A infiltração também apresentou uma elevada correlação, com R^2 superiores a 0.8, o que permite tal simplificação da modelagem. Assim, há um maior controle dos efeitos dos parâmetros de saída e uma análise mais assertiva dos resultados com foco na definição das faixas de variação. Em relação aos parâmetros de saída, manteve-se os índices e métricas de avaliação aplicados aos levantamentos de campo: UDI (iluminâncias úteis) para a análise luminosa, e Modelo Adaptativo ASHRAE-55:2013, para a térmica. Contudo, foram acrescentados mais dados de saída para a criação de uma análise mais abrangente da variação dos resultados.

Para térmica, além do índice de conforto adaptativo, também se acrescentaram o percentual de tempo em desconforto por calor e por frio e a análises das temperaturas operativas (T_o). Para iluminação, também se analisam os percentuais de tempo acima e abaixo da faixa de UDI. Ainda, manteve-se para as avaliações luminosas o horário das 7h às 18h, como considerado nos levantamentos, visto que é o período que melhor abrange os impactos da luz natural no interior do ambiente. Na tabela 5.9. é possível observar a caracterização dos parâmetros de saída.

Tabela 5.9 | Parâmetros de Saída do Modelo Base

Parâmetros de Saída - Luminoso		Parâmetros de Saída - Luminoso	
Parâmetros	Configurações Base	Parâmetros	Configurações Base
Faixa horária considerada	6h às 18h	Faixa horária considerada	O dia inteiro (24h)
Período de avaliação	anual	Período de avaliação	Anual e semanas típicas
Período de ocupação	RTQ - misto	Período de ocupação	RTQ - misto
Métrica de avaliação	UDI	Métrica de avaliação	Modelo Adaptativo ASHRAE 55
Faixa de UDI	100 lux a 3000 lux	Faixa de conforto	80% de aceitabilidade
Malha de avaliação	Distanciamento de 0.5m entre os pontos	Ventilação	Sem ventilação natural
Altura da malha	0.75m do piso		

5.4.1.2. CENÁRIOS

Os cenários estão organizados em dois grupos: análises de térmica e análises de iluminação, sendo a maioria dos parâmetros semelhantes a ambos os grupos. Cada cenário consiste em um único parâmetro de entrada composto por uma faixa de valores a ser perturbada. Existem diferentes abordagens para o quanto o valor do parâmetro é perturbado, mas geralmente um incremento proporcional é usado - por exemplo, aumentar ou diminuir um parâmetro em 10% do valor nominal até e incluindo um determinado limite (RAZAVI e GUPTA, 2015). Na tabela 5.10 apresenta-se um quadro síntese dos cenários, com a definição primária das faixas de valores a serem analisadas.

Tabela 5.10 | Quadro síntese dos cenários

Cenários	Faixa de Valores	Valores do Modelo Base	Análise de Sensibilidade	
			Térmica	Iluminação
1. CN-WWR: <i>Percentual de Vidro na Fachada</i>	40%; 50%;60%;70%	80%	aplica	aplica
2. CN-Aspect Ratio: <i>Profundidade de Planta</i>	3.5m; 5m; 6m; 7m	4m	-	aplica
3. CN-Pé-direito: <i>Altura do pé-direito</i>	3.0m; 3.5m; 4.0m; 5.5m	2.6m	aplica	aplica
4. CN-Sombreamento: <i>Sombreamento da abertura</i>	0m; 2.0m; 3.0m; 4.0m	1.0m	aplica	aplica
5. CN-Orientação: <i>Orientação da abertura</i>	NO; O; SO; S; SE; E; NE	N (norte)	aplica	aplica
6. CN-Entorno: <i>Altura do Entorno</i>	5pav; 10pav; 20pav	Sem entorno	-	aplica
7. CN-Massa: <i>Variações dos materiais da envoltória</i>	Nervurada; Forro; Sombreamento parede	Laje e parede padrão	aplica	-
8. CN-Exposição Solar: <i>Quantidade de fachadas externas</i>	1 fachada (parede); 3 fachadas (cobertura e 2 paredes);	2 fachadas (cobertura e parede)	aplica	-

Foram 24 análises de sensibilidade local em relação ao impacto nas variáveis de saída de térmica quando alterado os parâmetros de entrada. E 26 análises de sensibilidade local para lumínico. Conforme apresentado na tabela 5.10 as análises estão categorizadas em cenários referentes a cada parâmetro a ser analisado, contabilizando um total de 8 cenários, que são detalhados abaixo:

CN-WWR | Cenários de Porcentual de vidro na fachada: Considerou-se um incremento de 10% na variação da faixa de valores, com no máximo 80% e mínimo de 40%. Para o cálculo de cada percentual, manteve-se à altura do vidro em 2.4m e variou-se a largura conforme a fórmula:

$$Largura = (Área_{fachada} \times WWR) / 2.4$$

CN-Aspecto Ratio | Cenários de Profundidade da Planta: Conforme a variação do valor da profundidade, ajusta-se o comprimento da planta para que a área de piso interna seja sempre igual à 20m². Nas avaliações de iluminação, a profundidade da planta foi dividida em sete faixas, com uma distância aproximada de 0.5m entre pontos. Contudo, nos cenários de alterações de profundidade das plantas estas distâncias variaram.

CN-Pé-direito | Cenários de Pé-direito: com o aumento do pé-direito há um aumento da área de fachada em que está inserida a abertura. Para não alterar o percentual do vidro (WWR) do modelo base, manteve-se sempre 80% em relação à área de fachada e, portanto, área de vidro é ajustada de acordo com o pé-direito.

CN-Entorno | Cenários de Altura do Entorno: definiu-se um conjunto de variações de altura do entorno, tendo como base as diretrizes do plano diretor e do código de obras vigente na cidade de São Paulo. Definiu-se também 3.0m como afastamento mínimo entre a edificação e o entorno, a partir do final da varanda.

CN-Exposição Solar | Cenários de Quantidade de fachadas externas: foram analisadas quatro configurações de superfícies externas expostas ao sol e ao vento, sendo este parâmetro relacionado à posição das unidades no edifício: no meio (uma superfície vertical exposta), na cobertura (superfície horizontal exposta) e na quina (duas superfícies verticais expostas). Foram considerados as seguintes variações de posição: meio - apenas uma fachada exposta; cobertura - uma fachada e cobertura expostas; quina no meio - fachada com a abertura e fachada lateral expostas; quina na cobertura - cobertura, fachada com a abertura e fachada lateral expostas;

5.4.1.3. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE LOCAL - TÉRMICA

As análises de sensibilidade de térmica possibilitaram averiguar quais parâmetros são mais impactantes aos resultados e calibrar os valores a serem considerados nas faixas de variação. Para essa etapa, o período considerado de simulação é anual considerando as 24 horas do dia e, portanto, resultando em 8760 horas de análise por simulação. Logo, 1% na variação dos resultados de conforto térmico representa quatro dias no ano e 2% uma semana. Em relação à avaliação do conforto térmico do modelo base obteve-se 72% de horas anuais dentro da faixa de conforto de aceitabilidade de 80% da ASHRAE-55, sendo 11.2% das horas em desconforto por calor e 17.2% em desconforto por frio.

Inicialmente, foram realizadas avaliações comparativas entre as análises de sensibilidade considerando os resultados de conforto, desconforto por frio e por calor

de todos os cenários, por meio de mapas de hierarquia. O gráfico 5.22 compila todas as análises de sensibilidade realizadas pela gradação de cores de acordo com o percentual de horas dentro da faixa de conforto resultante para cada cenário. O gráfico 5.23 apresenta a hierarquia de desconforto por calor e o 5.24, desconforto por frio.

As análises variaram cerca de 10%, sendo o cenário de massa nervurada o maior percentual de conforto atingido, com 75.2% e o cenário sem sombreamento o menor valor, com 67%. Os cenários de exposição solar, sombreamento e massa foram os que apresentaram maior sensibilidade nos resultados do percentual de horas em conforto quando testado ou alterar os valores das faixas dos seus parâmetros de entrada. O primeiro (exposição solar) teve uma variação de 3% nos resultados, o segundo e o último de 6%.

Gráfico 5.22 | Mapa de hierarquia do conforto adaptativo (80% de aceitabilidade - ASHRAE 55) das análises de sensibilidade de térmica (24 testes).

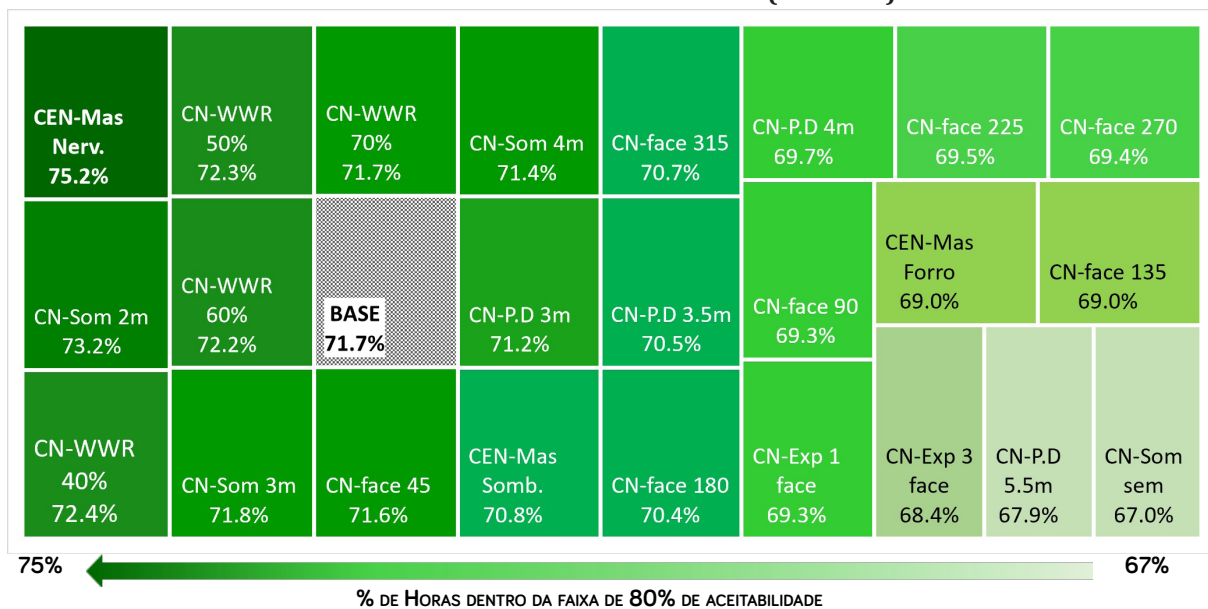


Gráfico 5.23 | Mapa de hierarquia de desconforto por calor (80% de aceitabilidade - ASHRAE 55) das análises de sensibilidade de térmica (24 testes).

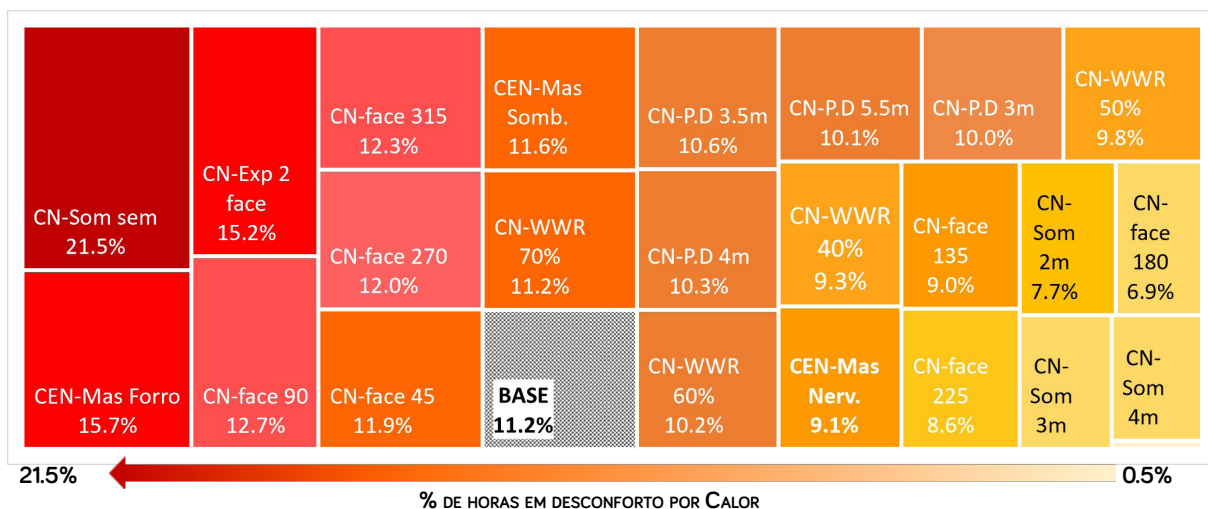
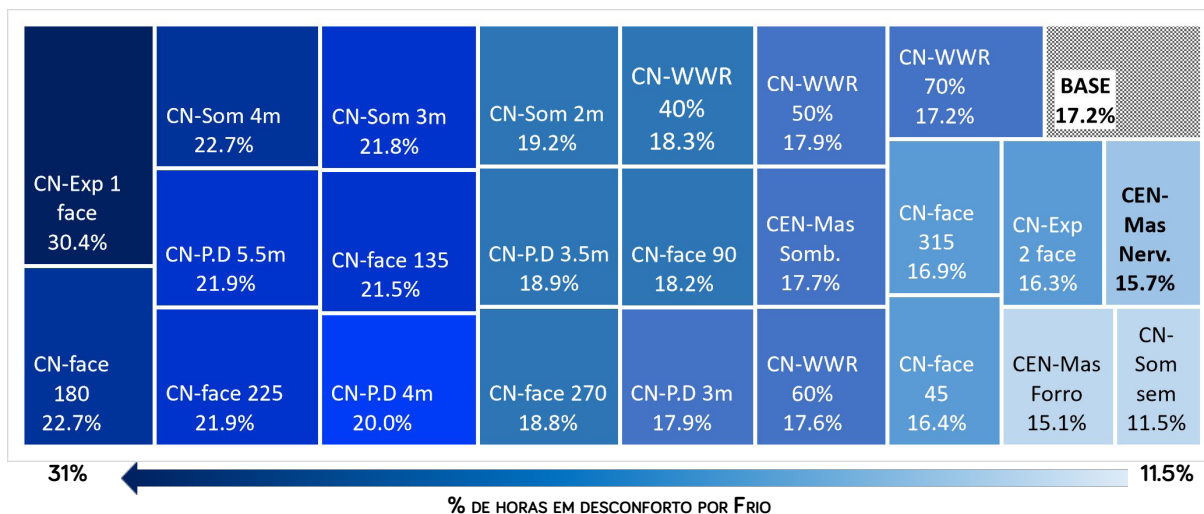


Gráfico 5.24 | Mapa de hierarquia de desconforto por frio (80% de aceitabilidade – ASHRAE 55) das análises de sensibilidade de térmica (24 testes).



Contudo, ao analisar os percentuais de desconforto observa-se uma maior sensibilidade dos parâmetros, em especial o de sombreamento, exposição e orientação. Quando há apenas 1 face exposta (CN-Exposição 1 face) à incidência solar o percentual de desconforto de calor é de 0.5%, porém ao aumentar o número de faces expostas estes valores crescem vertiginosamente e atingindo 15.6%. No sombreamento é semelhante, passa de 21.5% para 5.9%. Os parâmetros de CN-Pé-direito e CN=WWR foram o que apresentaram menores variações nos resultados.

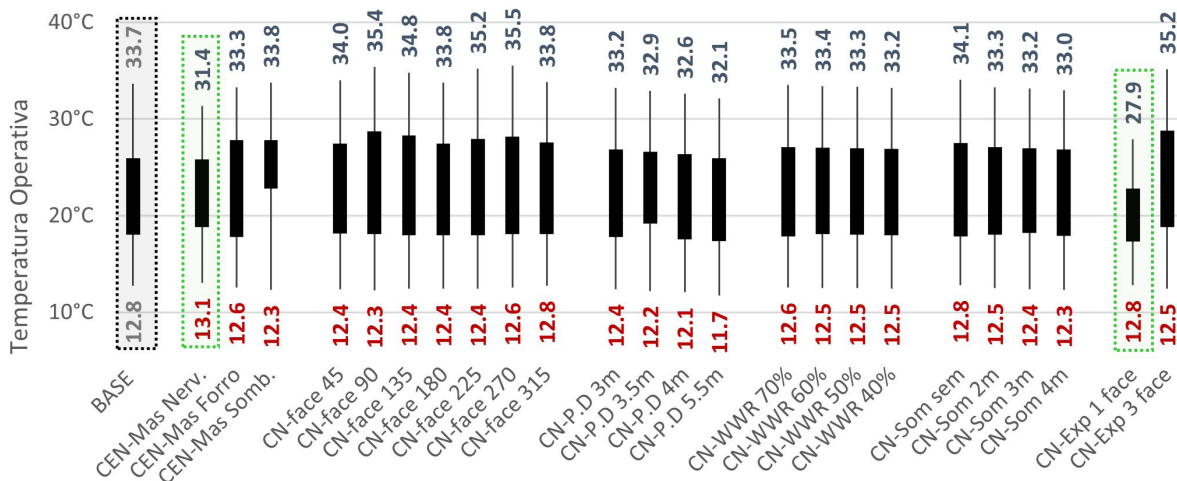
Além do percentual de conforto, também foram avaliadas as máximas, mínimas e as distribuições das temperaturas operativas para cada análise de sensibilidade, conforme representado no gráfico 6.5.2. As máximas oscilaram entre 27.9°C e 35.5°C, mas 55% dos testes concentraram-se na faixa de temperatura de 33°C. e apenas o CN-Exposição 1 face apresentou máxima abaixo de 30°C. Nas mínimas a oscilação foi muito menor, 90% dos casos concentraram-se na faixa de 12°C, sendo apenas um abaixo de 12°C e um acima de 12°C.

Em relação à amplitude de temperatura operativa obtidas, as distribuições permaneceram entre 18°C e 27°C. Os cenários CN-Massa, CN-Sombreada e o CN-Exposição 1face foram que apresentaram menor flutuação das temperaturas operativas internas, como também os menores extremos com máximas de 33.7°C e 27.9°C e mínimas de 13.1°C e 12.8°C, respectivamente. A maior máxima observada foi no cenário de orientação na face 270° (oeste), com 35.5°C, ainda, os casos com 3 faces expostas (sendo 1 a cobertura) e leste também apresentaram temperaturas acima de 35°C.

Os cenários de sensibilidade do CN-Pé-direito e do CN-WWR foram que demonstraram menor sensibilidade nas variações dos valores dos parâmetros. Os cenários de pé-direito concentram os percentuais de horas de conforto em 70%, com oscilação menor que 1% e temperaturas máximas entre 32°C e mínimas de 12°C. Os cenários de CN-WWR apresentaram

72% de horas de conforto e temperaturas máximas entre 33°C e mínimas de 12°C, com oscilações inferiores à 0.5°C.

Gráfico 5.25 | Gráfico de Erros das temperaturas operativas (máximas, mínimas e distribuição de 95%).



5.4.1.4. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE LOCAL - LUMINOSA

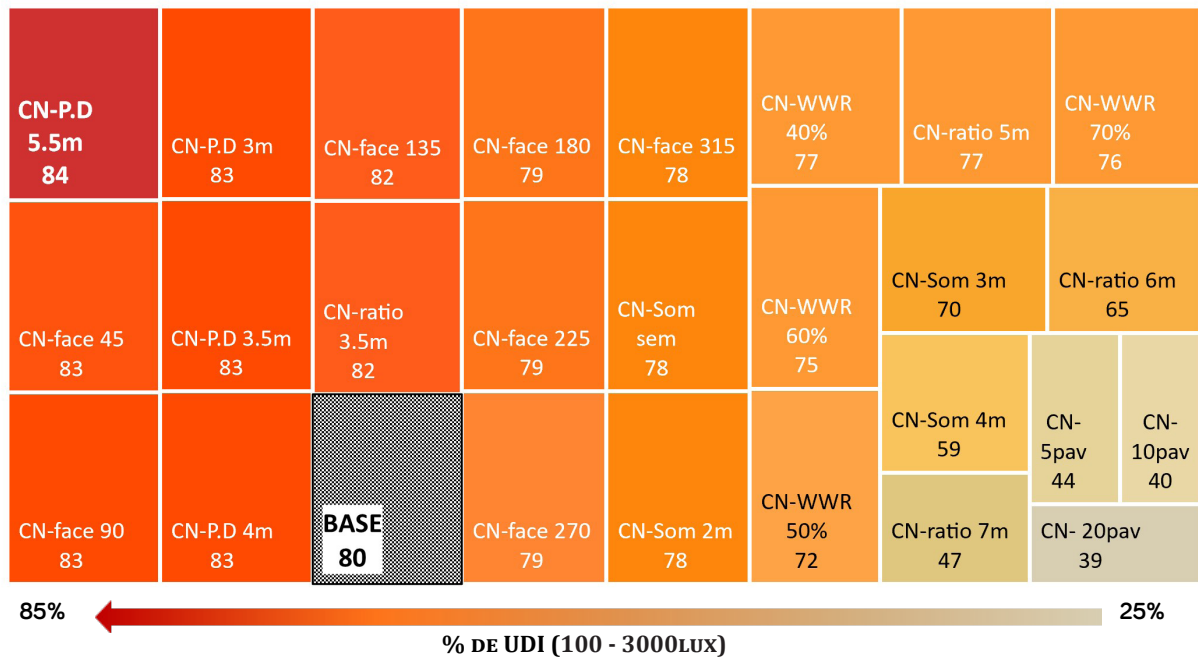
As análises de sensibilidade da iluminação natural possibilitaram averiguar quais parâmetros tem maior influência no conforto luminoso e calibrar os valores a serem considerados nas faixas. O período considerado de simulação é composto por todos os dias do ano das 7h às 18h o que resultou em 3960 horas e, portanto, 1% na variação dos valores de UDI representa dois dias no ano, 5% uma semana. A avaliação de iluminação natural do modelo base resultou em 80% de horas anuais dentro da faixa de conforto de UDI (100-3000lux).

Primeiramente, realizou-se a comparação global dos resultados de UDI (100-3000lux) de todos os cenários considerados, por meio de um mapa de hierarquia. O gráfico 5.26 compila todas as análises de sensibilidade realizadas pela gradação de cores de acordo com o nível de UDI resultante.

Observa-se que 30% das análises apresentaram resultados superiores ao modelo base (UDI= 80%) e 19% têm resultados inferiores à 50% das horas anuais de UDI. As maiores variações foram verificadas nos parâmetros de entorno (menor UDI 39%), sombreamento (menor UDI 59%) e profundidade de planta - aspect ratio (menor, UDI 47%). O pé-direito e a orientação apresentaram pouco impacto nos resultados de UDI em relação ao modelo base, sendo o maior UDI observado de 84% no cenário de pé-direito CN-P.D 5.5m.

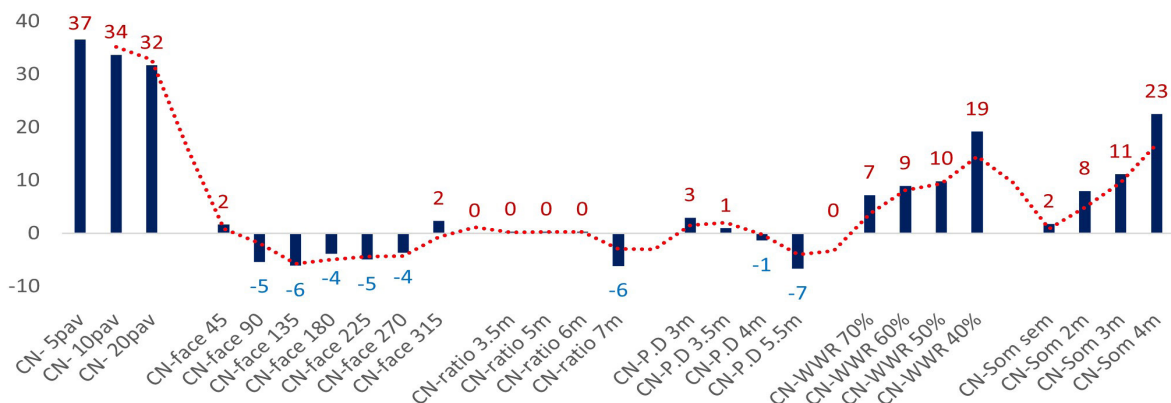
Para o entendimento da ocorrência dos percentuais de UDI no espaço em cada cenário, foram analisados os dados de UDI em cada ponto da malha. Assim, é possível compreender as ocorrências de máximas e mínimas, mas também o quanto flutuou a faixa de UDI dentro do ambiente. O gráfico 5.27 apresenta a covariância amostral entre os cenários e o modelo

Gráfico 5.26 | Mapa de hierarquia de UDI (100-3000lux) das análises de sensibilidade de Iluminação (26 testes).



base. A covariância amostral entre duas amostras descreve a direção e o grau com que as variáveis se associam linearmente. No gráfico, os valores negativos de covariância indicam que o cenário tende a apresentar uma amostra de percentis de UDI superiores aos do modelo base. Valores positivos são o inverso, o cenário tende a apresentar UDIs inferiores ao modelo base. Observa-se então que há a tendência de menor correlação com o modelo base as situações com menor acesso ao sol e ao céu, como os cenários de entorno e sombreamento.

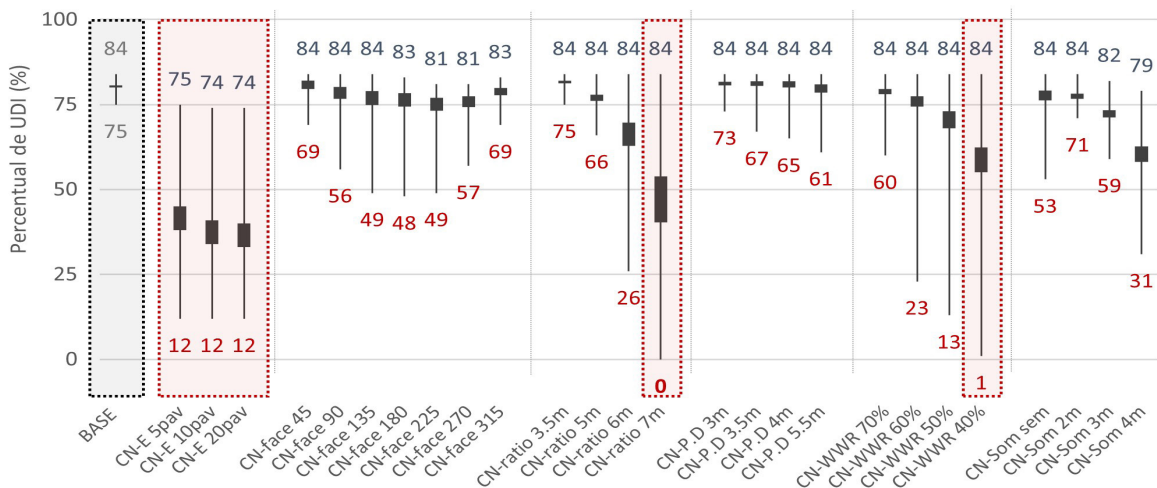
Gráfico 5.27 | Gráfico das Covariância entre o modelo base e os cenários de sensibilidade.



Ainda, apenas as variações de pé-direito e de orientação alcançaram UDI superiores ao modelo base, isso por serem os únicos parâmetros analisados que contribuem para o aumento do acesso ao céu e ao sol. As variações dos demais parâmetros resultaram na redução da penetração da luz natural direta e difusa. Contudo, é importante ressaltar que o excesso de luz natural, em especial a direta, pode acarretar valores superiores a 3000 lux e, conseqüentemente, reduzir o percentual de horas em conforto luminoso pela métrica aplicada, UDI.

Para tanto, torna-se fundamental analisar em que faixa de UDI a amostra está concentrada. Também é possível nesse tipo de análise perceber se há tendência de distribuição não homogênea da luz natural no espaço, visto o registro de valores muito distintos de iluminâncias. O gráfico 5.28 permite tal avaliação, uma vez que apresenta de forma comparativa as máximas, mínimas e as distribuições, com intervalo de confiança de 95%, das iluminâncias úteis (UDI 100 – 3000lux).

Gráfico 5.28 | Gráfico de Erros das Iluminâncias Úteis, UDI 100-3000lux (máximas, mínimas e distribuição de 95%).



Observa-se uma ocorrência concentrada na faixa entre 30% e 45% de horas anuais de UDI nos cenários de entorno, com máximas de aproximadamente 75%. Em relação à amplitude das faixas de UDIs, nos cenários de pé-direito e orientação constatou-se menor variação da distribuição dos valores UDIs, com variação de aproximadamente 15%. A profundidade de planta (aspect -ratio) e o percentual de vidro na fachada (WWR) foram os cenários com maior amplitude de UDIs, com variação de 40%.

Além de analisar as faixas de UDIs, avaliou-se a distribuição no espaço do percentual de horas de iluminâncias abaixo e acima da faixa de conforto luminoso (100-3000lux), podendo assim verificar os efeitos da luz natural no ambiente interno. Os gráficos das distribuições dos percentuais de iluminâncias no espaço, por meio de um corte transversal, para cada cenário podem ser consultados no apêndice deste trabalho.

Em plantas mais profundas ou com aberturas mais estreitas constatou-se a maior possibilidade de ocorrência de ofuscamento por contraste de iluminâncias e a maior concentração de iluminâncias inferiores a 100 lux. Ainda, nas variações da faixa de percentual de vidro na fachada percebe-se o aumento da frequência de horas com iluminâncias menores que 100lux na região mais próxima a abertura (0.5m), indicando situação de ofuscamento. Tal situação decorre da diminuição da largura do vidro, uma vez que se manteve a altura para todos as análises, que cria regiões com menor incidência da luz na lateral da fachada. A redução da largura das aberturas, além de afetar a quantidade de luz natural que penetra

no ambiente, também intensifica a distribuição não homogênea no espaço.

As variações de pé-direito e orientação afetaram mais significativamente o percentual de horas acima de 3000lux que os demais parâmetros. Em contrapartida, o sombreamento e o entorno aumentaram a ocorrência de iluminâncias abaixo de 100lux. Por fim, foi possível identificar quais faixas de variação podem ser reduzidas e quais devem ser mais estratificadas. As variações de CN-Pé-direito, CN-WWR e CN-Sombreada podem ser simplificadas em relação aos efeitos nos resultados da avaliação de iluminação natural. No entanto, as faixas de variação a serem consideradas no modelo parametrizado foram definidas a partir da análise conjunta de sensibilidade local de térmica e luminosa, devido ao efeito integrado dos parâmetros nos resultados.

5.4.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises de sensibilidade permitiram calibrar as faixas de valores dos parâmetros que serão incorporados no modelo multiobjetivo parametrizado. Essas análises identificaram o impacto isolado de cada oscilação dos parâmetros nos resultados, não contemplando o efeito casado nos resultados devido às alterações concomitante de diversos parâmetros de entrada. Assim o que se observou foi o baixo impacto dos cenários de pé-direito tanto em térmica, quanto em lumínico e, portanto, o número de valores a serem integrados será diminuído, excluindo o valor 3.5m.

As análises do percentual de vidro na fachada também apresentaram menor sensibilidade e para a incorporação no modelo parametrizado foi considerado trabalhar com faixa de variação de 15%, passando a ser composta por 80%, 65%, 50% e 35%. Por fim, para otimização das simulações parametrizadas, observou-se também que o impacto nos resultados em sombreamentos maiores de 3.0m de profundidade não diferem muito entre si, sendo assim o limite de profundidade de sombreamento a ser considerado será de 3.0m.

O entorno no modelo multiobjetivo parametrizado será testado a partir do seu afastamento e não de sua altura. Tal mudança ocorreu devido às análises de sensibilidade desse parâmetro, pois percebeu-se que edifícios acima de 5 pavimentos apresentam o mesmo efeito de obstrução. Entretanto, ao conservar a altura do entorno, o distanciamento entre as edificações se torna mais preponderante. Portanto, para o modelo multiobjetivo parametrizado será considerado o entorno com edifícios de 5 pavimentos e distanciamento de 3m, 5m, 10m e sem obstrução de entorno.

De forma geral, os resultados globais das análises de sensibilidade dos parâmetros de entrada demonstraram pouca variação do percentual de horas anuais em conforto (luminoso e térmico), com exceção do entorno para iluminação e, do sombreamento e da exposição solar para térmica. Como a disponibilidade de luz natural para a cidade de São Paulo não apresenta grandes variações ao longo do ano, o que mais dificulta a permeabilidade da luz

natural são as obstruções, sendo estes o entorno e o sombreamento. No entanto, as variações do percentual de vidro na fachada e da profundidade de planta afetaram significativamente as distribuições da iluminâncias, criando maior contraste de luz no interior do espaço.

Para térmica, a quantidade de superfícies expostas é preponderante no conforto térmico, em especial a superfície horizontal, pois está diretamente relacionada ao aumento da capacidade de ganho solar e de maior incidência à radiação direta e difusa. Outro parâmetro relevante foi a orientação, em faces voltadas à oeste verificou-se a ocorrência de temperaturas mais elevadas e conseqüentemente de um maior percentual de horas em desconforto por calor.

Por último, a descrição mais detalhada de cada parâmetro de entrada incorporado ao modelo multiobjetivo parametrizado final, assim como o processo de parametrização serão apresentados no próximo capítulo. A etapa de análise de sensibilidade local abordada aqui contribuiu para a otimização das faixas de valores dos parâmetros de entrada do modelo final. As análises de sensibilidade global, em que se é possível avaliar a interação e a relevância das soluções nos resultados, serão realizadas na etapa de pós-modelagem como tratamento estatístico dos resultados.

6.1. INTRODUÇÃO

A fase de modelagem descreve a metodologia aplicada ao desenvolvimento do modelo parametrizado. Nessa pesquisa, o modelo multiobjetivo parametrizado é pautado em simulações integradas de desempenho térmico e luminoso, que suportarão à tomada de decisão no início do processo de projeto (etapa de concepção).

Para tanto, foi utilizado a abordagem estatística que possibilita a exploração do vasto universo de soluções do projeto, além de lidar com as incertezas do processo (OSTERGARD *et al*, 2016). Segundo Ostergard et al (2016), o método estatístico consiste na execução de um grande volume de forma estruturada por meio do uso de técnicas estatísticas para orientar a tomada de decisão a partir de dados simulados. Tais dados simulados foram obtidos a partir do modelo multiobjetivo parametrizado que permitiu a simulação integrada (térmica e iluminação natural) e automatizada de 73.728 cenários.

O desenvolvimento da fase de modelagem está ilustrado no fluxograma da figura 6.1. que sintetiza o fluxo de atividades aplicados ao desenvolvimento do produto final dessa pesquisa.

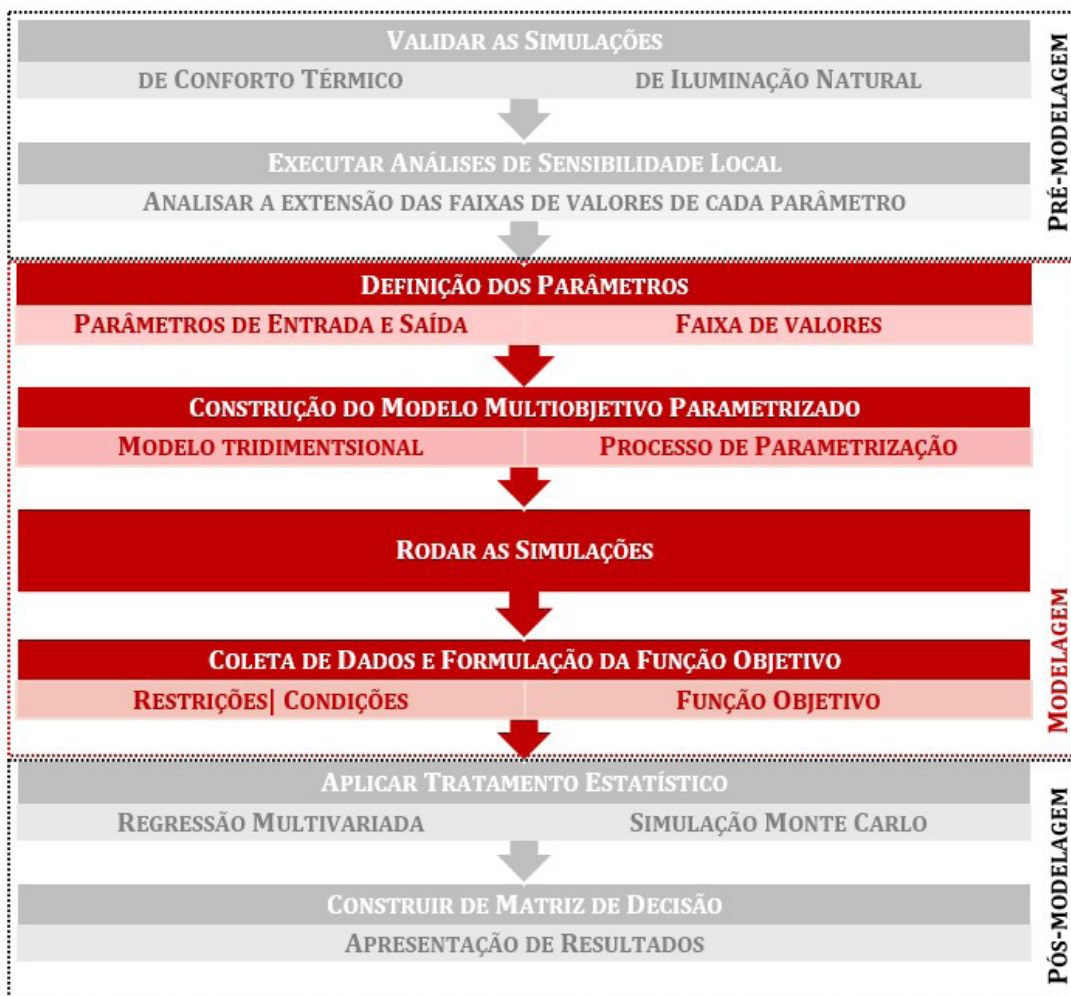


Figura 6.1 | Fluxograma das atividades de desenvolvimento da pesquisa | Fonte: autoral

A seguir apresenta-se o detalhamento de cada etapa da fase de modelagem descrevendo os processos e procedimentos adotados.

6.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Na etapa de concepção as definições do edifício são restritas, no entanto, para rodar as simulações ambientais é necessário um extenso conjunto de parâmetros de entradas que definem a geometria do edifício, as condições de ocupação e as variáveis externas de clima e implantação. Para resolver tal questão, os parâmetros de entradas vitais à simulação podem ser fixados a partir de valores predefinidos baseados no tipo do edifício (HYGH *et al*, 2012). De acordo com os autores, primeiramente identificam-se os parâmetros de entrada chave relevantes às decisões em etapa conceitual de projeto. A escolha destes e as suas faixas de valores associadas definirão o universo de projeto a ser explorado.

Assim, para a definição inicial dos parâmetros de entrada dessa pesquisa foram levadas em considerações questões pertinentes às legislações vigentes de ocupação e uso do solo, à tipologia abordada e aos padrões construtivos da construção civil paulistana aliadas aos resultados obtidos na fase de pré-modelagem. Além disso, há parâmetros que são variáveis e serão testados pelo modelo parametrizado e há parâmetros fixos que não se alteram independentemente do cenário testado. Os parâmetros fixos são referentes ao perfil de ocupação e às configurações de simulação. A tabela 6.1. elenca os parâmetros fixos e os parâmetros variáveis.

Tabela 6.1 | Quadro síntese dos Parâmetros de entrada fixos e variáveis

PARÂMETROS DE ENTRADA FIXOS			
PERFIL DE OCUPAÇÃO E CARGA		CONTROLES DE SIMULAÇÃO	
PARÂMETROS	CONFIGURAÇÕES	PARÂMETROS	CONFIGURAÇÕES
Período de ocupação	(RTQ-R 2012) - misto	Ventilação	30% da abertura para ventilação
Número de Pessoas	2 pessoas	Arquivo Climático	BRA_SP_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800_TMY
Taxa Metabólica	108 W	AirflowNetwork	MultizoneWithDistribution
Iluminação	5W/m ²	Programa - Térmica	Energyplus 9.2.1
Equipamentos	120 W	Programa - Luminoso	Radiance/ Daysim
CONFIGURAÇÕES CONSTRUTIVAS			
PARÂMETROS	P: REFLETÂNCIA SOLAR	PARÂMETROS	CONFIGURAÇÕES
Alvenaria Externa	0.6	Vidro	TRANS. VISÍVEL 87% U: 5.70W/M2-K FATOR SOLAR: 0.86
Alvenaria Interna	0.7	Tipo de abertura	Porta de 2 folhas de correr
Teto	0.8	Período de operação da Abertura	Somente quando ocupado
Piso	0.35	Área de piso	20m ²
Entorno	0.35		

PARÂMETROS DE ENTRADA VARIÁVEIS			
GEOMÉTRICO – DE PROJETO		CONSTRUTIVO – DE PROJETO	
PARÂMETROS	FAIXA DE VALORES	PARÂMETROS	FAIXA DE VALORES
Profundidade de planta (m)	3.5 – 4.0 – 6.0	Massa térmica (componentes de vedações)	Leve (inércia fraca: 0.6) – Pesada (inércia média: 0.8)
Pé-direito (m)	2.6 – 3.0 – 4.0 – 5.5		
Percentual de área de vidro – WWR (%)	35 -50 - 65 - 80		
Sombreamento (m)	0 (sem) – 1.5 – 3.0		
VENTILAÇÃO – DE PROJETO		EDIFÍCIO – IMPLANTAÇÃO	
PARÂMETROS	FAIXA DE VALORES	PARÂMETROS	FAIXA DE VALORES
Tipo de ventilação	1 abertura (simples) e 2 aberturas (cruzada)	Orientação	N –NO – O- SO– S– SE- E- NE
		Posição da unidade no edifício	Na cobertura e no meio – na cobertura e quina –entre pavimentos e meio – entre pavimentos e quina.
ENTORNO – URBANO (IMPLANTAÇÃO)			
PARÂMETROS	FAIXA DE VALORES		
Entorno (m)	Sem – distante 3m – distante 5m – distante 10m		

Os parâmetros de entrada variáveis foram categorizados em quatro grupos de acordo com a esfera que se enquadram: projeto, implantação e urbano. Os parâmetros de projeto abrangem premissas referentes à geometria das unidades e aos materiais. Os parâmetros de implantação estão relacionados às especificidades do lote e do edifício, como a orientação e a posição das unidades no edifício. Por último, considerou-se os impactos de obstrução devido à formatação urbana.

O espaço urbano da cidade de São Paulo é legislado principalmente pelo código de obras e as regras de ocupação e uso do solo, que atualmente são bastante permissivos quanto a proximidade do entorno, dispensando a necessidade de recuos laterais e do fundo. Assim, a obstrução devido à proximidade do entorno tornou-se imperativa à promoção do conforto e por isso entendeu-se a necessidade de incorporar tal parâmetro na modelagem. Ainda, a legislação vigente deixou à cargo da norma ABNT-NBR 15575 de desempenho dos espaços residenciais a regulamentação dos requisitos de habitabilidade dos edifícios e, portanto, para a configuração dos parâmetros de entrada e saída considerou-se não apenas as legislações, como também as normativas inerentes ao conforto térmico e luminoso. As métricas de avaliação aplicadas nessa pesquisa referentes ao desempenho térmico e da luz natural são mais restritivas do que da referida normativa brasileira. Logo, a conformidade com a modelagem implica a conformidade com a legislação e normativas vigentes.

A seguir apresenta-se as considerações realizadas para definição dos parâmetros de entrada apresentados na tabela 6.1.

6.2.1. DETALHAMENTO DOS PARÂMETROS FIXOS

PERFIL DE OCUPAÇÃO: baseou-se no Regulamento Técnico da Qualidade - INMETRO (RTQ-R, 2012) para os períodos de ocupação, quantidade de pessoas e cargas internas. Como trata-se de um espaço integrado, microapartamento, o relatório o considera como ocupação mista, ou seja, o mesmo ambiente é utilizado como dormitório e sala.

CARGA INTERNA: os valores de carga interna seguiram as especificações da norma ABNT NBR 15575-2021 Edificações Habitacionais – Desempenho, parte 1 “Requisitos gerais”.

VENTILAÇÃO: o percentual de abertura e o método de cálculo de ventilação do programa de simulação (airflownetwork) seguiram os resultados da validação das simulações de térmica da fase de pré-modelagem.

CONFIGURAÇÕES CONSTRUTIVAS - MATERIAIS: seguiram os resultados da análise de sensibilidade local da fase de pré-modelagem.

TIPO DE ABERTURA E ÁREA DE PISO: são características geométricas consideradas como parâmetros fixos na modelagem por serem predominantes a atual tipologia de microapartamentos paulistana conforme explicitado por Leme e Monteiro (2016). A pesquisa concentra-se na avaliação e na matriz de decisão de conforto térmico e luminoso de microapartamentos e, portanto, premissas pertinentes a tal tipologia foram consideradas na configurações das modelagens.

6.2.2. DETALHAMENTO DOS PARÂMETROS VARIÁVEIS

PROFUNDIDADE DA PLANTA (M): Manteve-se sempre uma área de aproximadamente 20m², então conforme a varia-se o valor da profundidade, ajusta-se o comprimento da planta para que a área de piso interna seja sempre igual à 20m², segundo fórmula:

$$profundidade=(Área_{piso} \times comprimento)/20$$

PÉ-DIREITO (M): com o aumento do pé-direito há um aumento da área de fachada em que está inserida a abertura. Para não alterar o percentual do vidro (WWR) do modelo base, manteve-se sempre 80% em relação à área de fachada e, portanto, área de vidro é ajustada de acordo com o pé-direito.

PORCENTUAL DE VIDRO NA FACHADA (%): Considerou-se um incremento de 15% na variação da faixa de valores, com no máximo 80% e mínimo de 35%. Para o cálculo de cada percentual, manteve-se à altura do vidro em 2.4m e variou-se a largura conforme a fórmula:

$$largura=(Área_{fachada} \times WWR)/2.4$$

SOMBREAMENTO (M): foi considerado uma geometria de sombreamento semelhante a de varanda, ou seja, há superfície nos 4 vértices da fachada frontal. O que se variou foi a

profundidade do sombreamento e não o ângulo de proteção solar, sendo o limite de 3.0m. MASSA TÉRMICA: foram estudados padrões construtivos de mercado, a difusividade, a inércia térmica, capacidade térmica (C) e a transmitância total (U) dos componentes e materiais para a definição dos valores de composição de materiais que representassem a massa térmica. Na tabela 6.2 apresenta-se os valores e composição construtivas para as duas variações de massa térmica consideradas. Para o cálculo de inércia foi utilizado o método simplificado de Croiset (1972).

Tabela 6.2 | Parâmetros de avaliação de massa térmica e condutância

PARÂMETRO MASSA TÉRMICA CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS COMPOSIÇÃO						
	INÉRCIA	SUPERFÍCIE EQU. PESADA	LOCAL	COMPOSIÇÃO	U (W/M ² K)	C (KJ/M ² K)
LEVE	FRACA (M:0.6)	165 KG/M ²	PAREDE	BLOCO CONCRETO 18CM	2,5	285
			COBERTURA	LAJE MACIÇA 12CM + FORRO GESSO 2CM	1,9	348
PESADA	MÉDIA (M:0.8)	233 KG/M ²	PAREDE	PAREDE MACIÇA 18CM	3,4	498
			COBERTURA	LAJE NERVURADA 18CM	3,0	283

TIPO DE VENTILAÇÃO: as validações das simulações indicaram a relevância dos casos com ventilação simples e cruzada. Como verificou-se elevada correlação entre os dados simulados e medidos desses dois casos, optou-se por considerá-los na modelagem.

No caso com a ventilação cruzada, foi inserida uma abertura alta na parede oposta à abertura da fachada frontal, considerando uma área de vidro equivalente a 30% da área de vidro da fachada frontal. Para manter o paralelismo, manteve-se a altura da abertura, variando apenas a largura.

POSIÇÃO DA UNIDADE NO EDIFÍCIO: este parâmetro se refere a quantidade de superfícies expostas ao sol e ao vento e é representado pela posição das unidades no edifício: no meio (uma superfície vertical exposta), na cobertura (superfície horizontal exposta) e na quina (duas superfícies verticais expostas). Foram considerados as seguintes variações de posição: entre pavimentos e meio - apenas uma fachada exposta; cobertura e meio - uma fachada e a cobertura expostas; entre pavimentos e quina - duas fachadas verticais expostas; cobertura e quina - cobertura, duas fachadas verticais expostas;

ENTORNO (M): para definição dos valores das faixas de distanciamento do entorno foram considerados o impacto do entorno no desempenho e o mínimo e máximo da legislação. Em relação ao impacto no desempenho, observou-se nas análises de sensibilidade que edifícios próximos com mesma altura não impactam significativamente nos resultados, mas com entorno mais alto pelo menos um pavimento o impacto é relevante. A partir de três pavimentos mais alto não há incremento no impacto.

Assim, considerou-se entorno mais alto em dois pavimentos e variações de distanciamento entre a unidade e o edifício. O distanciamento mínimo foi de 3 metros e

máximo de 10 metros, uma vez que acima desse valor não se verificou alterações no impacto da obstrução. Por fim, também foi inserido a situação sem entorno.

O quadro dos cenários agrupa os parâmetros variáveis e fixos de forma esquemática, identificando assim todas as possíveis combinações.

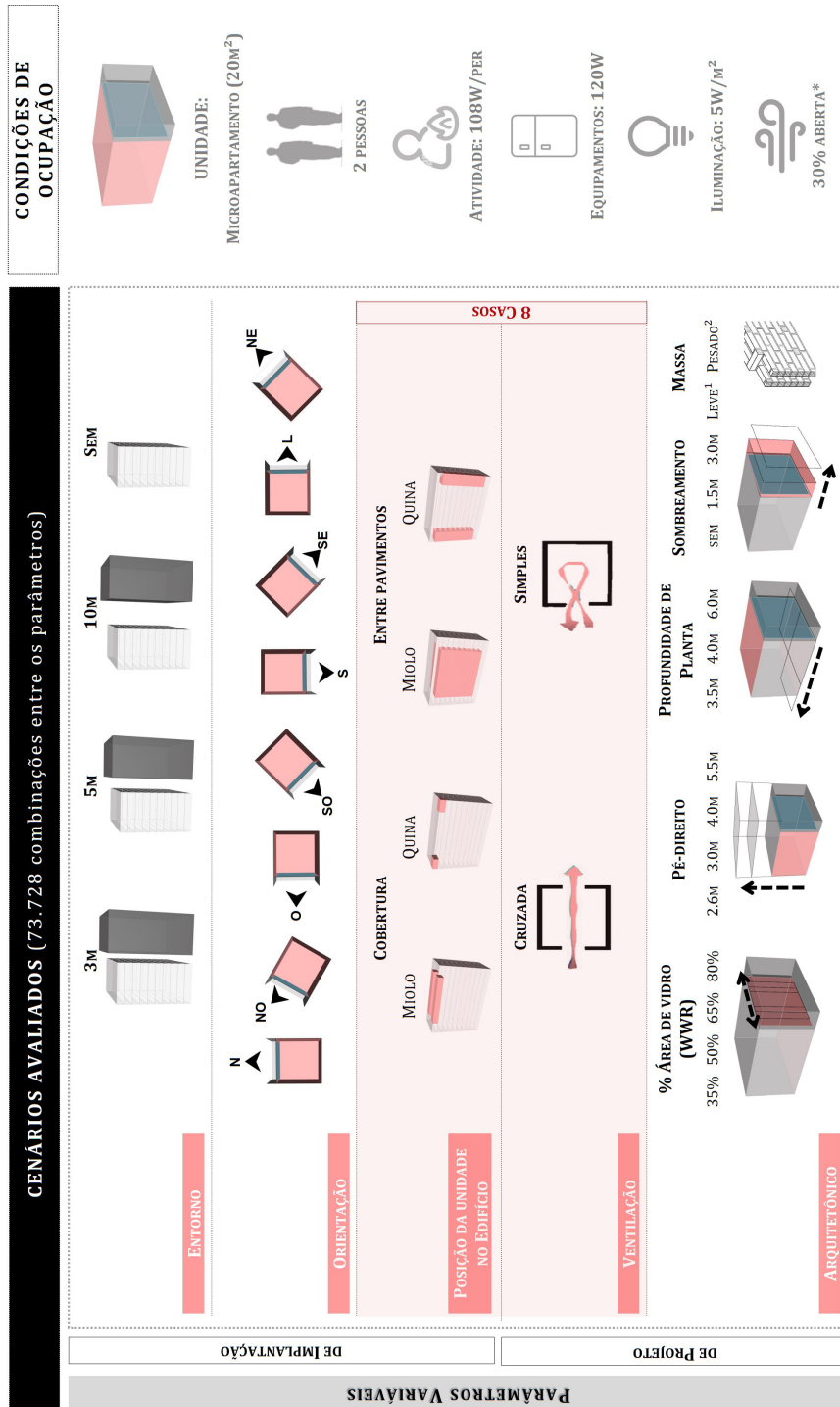


Figura 6.2 | Quadro síntese da construção da combinação dos cenários | Fonte: autoral

Em relação aos parâmetros de saída, foram utilizados o índice do Modelo Adaptativo ASHRAE-55:2013, para a térmica, e a métrica de Iluminâncias Úteis da Luz Diurna (UDI) com faixa entre 100lux e 3000lux, para a iluminação natural. Também foram acrescentados outros dados de saída para a criação de uma análise mais consistente dos resultados, conforme

descrito na tabela 6.3.

Tabela 6.3 | Quadro síntese dos Parâmetros de saída

PARÂMETROS DE SAÍDA			
PARÂMETROS DE SAÍDA - LUMINOSO		PARÂMETROS DE SAÍDA - TÉRMICA	
PARÂMETROS	CONFIGURAÇÕES BASE	PARÂMETROS	CONFIGURAÇÕES BASE
FAIXA HORÁRIA CONSIDERADA	6H ÀS 18H	FAIXA HORÁRIA CONSIDERADA	O DIA INTEIRO (24H)
PERÍODO DE AVALIAÇÃO	ANUAL	PERÍODO DE AVALIAÇÃO	ANUAL
PERÍODO DE OCUPAÇÃO	RTQ - MISTO	PERÍODO DE OCUPAÇÃO	RTQ - MISTO
MÉTRICA DE AVALIAÇÃO	UDI	MÉTRICA DE AVALIAÇÃO	MODELO ADAPTATIVO ASHRAE 55
FAIXA DE UDI	100 LUX A 3000 LUX	FAIXA DE CONFORTO	80% DE ACEITABILIDADE
MALHA DE AVALIAÇÃO	DISTANCIAMENTO DE 0.5M ENTRE OS PONTOS	VENTILAÇÃO	AIR FLOW NETWORK
ALTURA DA MALHA	0.75M DO PISO		PERCENTUAL DE HORAS EM CONFORTO (FAIXA 80% DE ACEITABILIDADE)
			PERCENTUAL DE HORAS EM DESCONFORTO POR FRIO
DADOS DE SAÍDA	DENTRO DA FAIXA DE UDI - MODA ABAIXO (<100LUX) ACIMA (>3000LUX)	DADOS DE SAÍDA	PERCENTUAL DE HORAS EM DESCONFORTO POR CALOR TEMPERATURA OPERATIVA MÁXIMA TEMPERATURA OPERATIVA MÍNIMA.

Em relação aos dados de saída, algumas considerações serão explicitadas para uma melhor compreensão das análises.

6.2.3. DETALHAMENTO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA

MODA UDI: a métrica de iluminação natural é referente ao percentual de ocorrência das iluminâncias úteis em cada ponto da malha. Para transformar esses valores em uma única medida, foi utilizada a moda. A distribuição dos percentuais de iluminâncias é assimétrica e por isso a medida que melhor representa a maioria das ocorrências é a moda, conforme ilustrado na figura 6.2. Moda é definida como o valor de máxima frequência dentre um conjunto de valores, sendo esta uma medida de posição (Neto, 2002). A moda é calculada pela equação:

$$moda=L+d_1/(d_1+d_2)*h$$

onde

L: o limite inferior da classe modal; *h:* amplitude das classes

d1: a diferença entre a frequência da classe modal e da classe imediatamente anterior;

d2: a diferença entre a frequência da classe modal e da classe imediatamente seguinte;

<100LUX E >3000LUX UDI: considerou-se também as modas dos percentuais de iluminâncias inferiores a 100lux e superiores a 3000lux, ou seja, abaixo e acima da faixa de UDI aplicada.

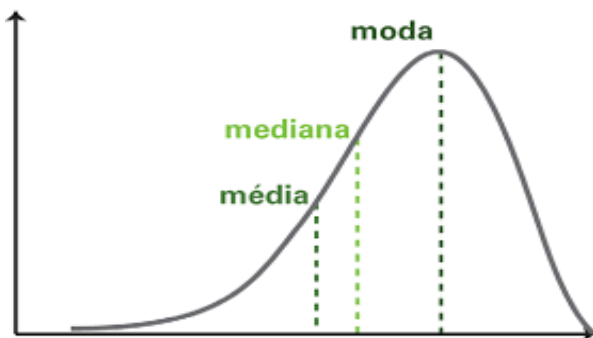


Figura 6.3 | Diferença entre média, mediana e moda na distribuição assimétrica | Fonte: www.linkedin.com/pulse/

PERCENTUAIS DE HORAS DE CONFORTO (HC): o percentual de horas de conforto foi aplicado apenas durante o período de ocupação, que representa 5720 horas anuais e tem como limite a zona de conforto delimitada pela faixa de 80% de aceitabilidade do modelo adaptativo da ASHRAE-55 2013.

PERCENTUAIS DE HORAS DE DESCONFORTO (HFRIO/ HCALOR): foi calculado o percentual de horas de desconforto, dividindo-o em desconforto por frio, ou seja, abaixo da zona e por calor, acima. O percentual de horas devido ao desconforto por frio foi analisado de duas maneiras:

1. **Total de desconforto por frio (abaixo da zona de conforto 80%).**
2. **Percentual de desconforto por frio considerando a capacidade de adaptação** devido às trocas radiantes com os estofados. Como já citado, segundo Lin e Deng (2008), o efeito do isolamento térmico do sistema da cama na temperatura operativa é de aproximadamente 5.3°C por clo, o que afeta significativamente a temperatura neutra durante o sono.

Nesse caso, considerou como cálculo da temperatura limite inferior da zona após adaptação:

$$T_{(frio\ adaptação)} = 0.31T_0 + 17.8 - (3.5 + 1.75)$$

Importante ressaltar que não houve alteração do cálculo do percentual de horas em conforto pelo índice do modelo adaptativo. Aplicou-se a mesma equação para delimitação da zona de conforto de 80% de aceitabilidade descrita na ASHRAE-55. Não é objetivo dessa pesquisa investigar tal assunto, porém é relevante indicar a possível economia de consumo energético ao ponderar tais limites da zona de conforto em relação ao contexto climático e ao perfil de ocupação dos espaços avaliados. Como mencionado, diversas pesquisas (ALEX et al, 2012; BRAVO et GONZALEZ, 2013; YANG

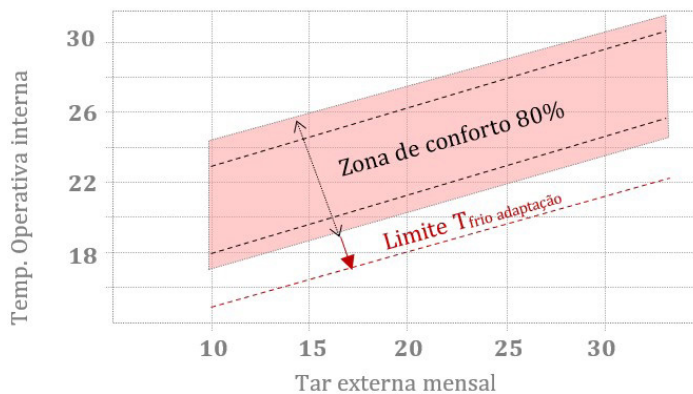


Figura 6.4 | Modelo Adaptativo representando a faixa para temperatura de desconforto por frio de adaptação | Fonte: autoral

et al, 2013; INDAGRANTI, 2010) discutem a definição de índices de conforto adaptativo mais compatíveis aos espaços residenciais e a diferentes contextos climáticos, isso não é o objetivo dessa pesquisa. As análises em relação ao percentual de desconforto por frio considerando a capacidade de adaptação serão discutidas no item 6.2.5 *Coleta de dados e Formulação da função objetivo*.

TEMPERATURAS OPERATIVAS MÁXIMAS E MÍNIMAS: são as temperaturas operativas máximas e mínimas durante o período de ocupação para cada cenário.

6.2.4. CONSTRUÇÃO DO MODELO MULTIOBJETIVO PARAMETRIZADO

O desempenho energético é sensível à massa e à geometria do edifício e, portanto, o modelo deve assumir uma forma específica inicial. A construção do modelo multiobjetivo parametrizado parte de uma geometria base resultante da combinação dos valores iniciais dos parâmetros de entrada variáveis. A partir do algoritmo generativo inicia-se a roda de simulações que só será finalizada após a execução de todas as combinações possíveis dos parâmetros variáveis conectados ao plug in de parametrização. O processo descrito acima é representado pelo esquema da figura 6.6, e executado pelos programas Rhinoceros (Robert McNeel, 1993) e Grasshopper (Robert McNeel, 1993) para modelagem tridimensional; Radiance e Energyplus para simulação termo-luminosa por meio dos plug in Ladybug e Honeybee (Ladybug Tools LLC, 2017); e o plug in colibri, algoritmo generativo, (CORESTUDIO, 2017) para parametrização e automação das simulações.

Todo o processo foi desenvolvido no ambiente do grasshopper a partir do roteiro ilustrado na figura 6.5. O processo de simulação foi dividido em 8 partes baseada na combinação da posição da unidade no edifício e a ventilação, possibilitando assim rodadas de simulações simultâneas o que reduziu o tempo de processamento.

Cada parte rodava 9216 cenários que considerava todo o universo de combinação dos parâmetros de entrada relacionados à geometria, material, entorno e orientação. Tal organização também será base para o tratamento e discussão dos resultados, em que as 8 partes serão nomeadas como casos.

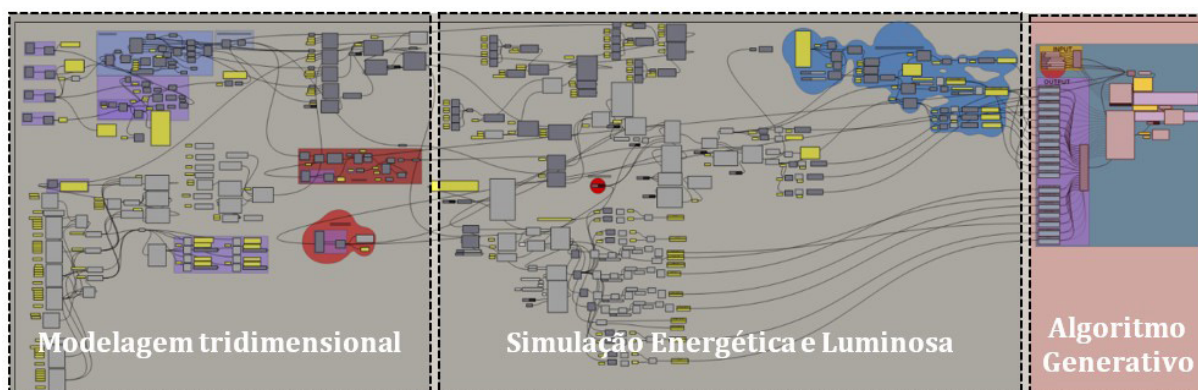


Figura 6.5 | Roteiro da modelagem parametrizada no Grasshopper | Fonte: autoral

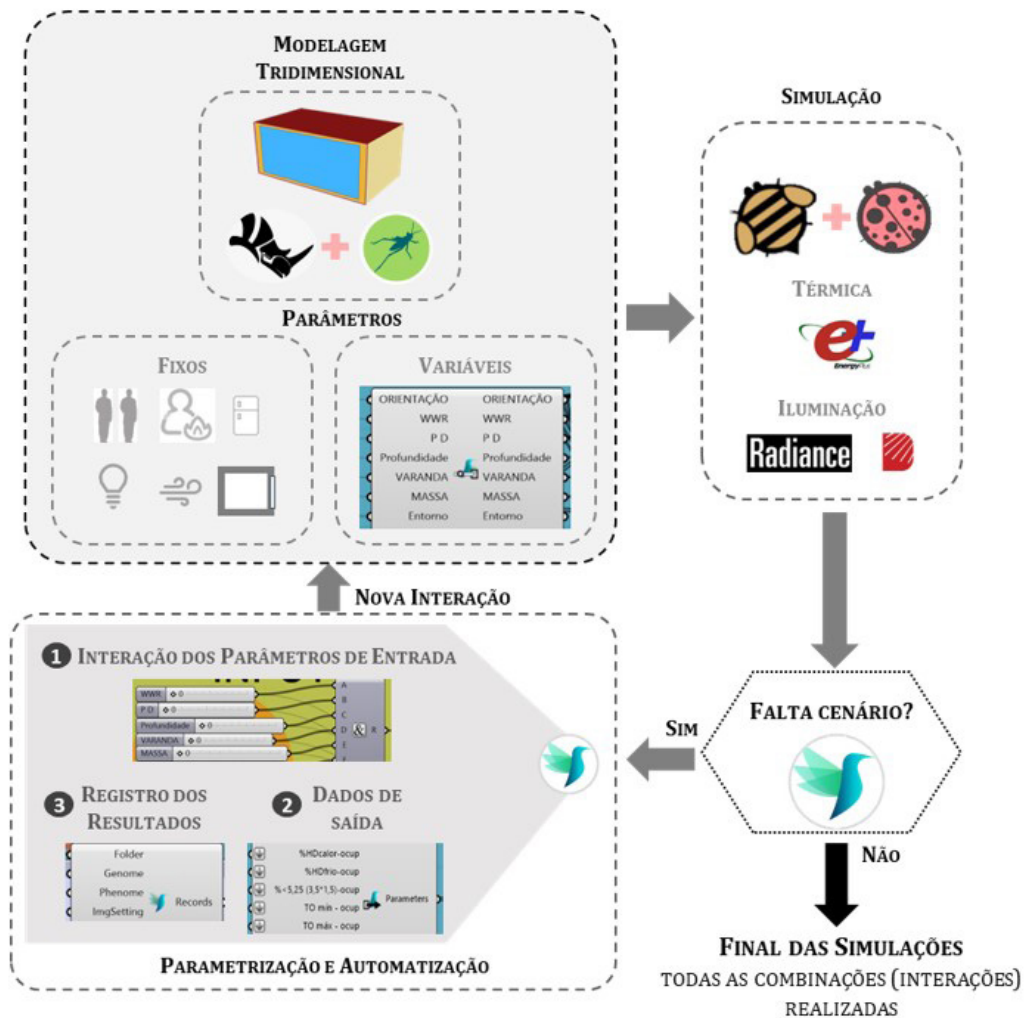


Figura 6.6 | Fluxo de trabalho do processo de simulação generativa | Fonte: autoral

6.2.5. COLETA DE DADOS E FORMULAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO

Os dados de saída de cada caso eram coletados a partir da aplicação da função objetivo. Uma abordagem para resolver um problema multiobjetivo consiste em definir um único objetivo como a soma ponderada de todos os objetivos individuais f_i (BRE et al, 2016). Isso produz um problema mono-objetivo, em que a qualidade da solução depende da escolha dos fatores de peso.

$$\min_{\mathbf{x}} [f_1(\mathbf{x}) \ f_2(\mathbf{x}) \ \dots \ f_N(\mathbf{x})], \tag{1}$$

where f_i denotes a specific objective and \mathbf{x} is the set of design variables.

Assim, como o objetivo da modelagem é maximizar o desempenho termo-luminoso, utilizou-se a equação abaixo como função objetivo que representa a avaliação do desempenho integrado entre térmica e iluminação natural.

Em relação às ponderações definidas na equação, entende-se que a térmica é mais

$$F_{\text{Desempenho Integrado}} = \frac{0.7 * \% \text{ Horas de Conforto}_{80\% \text{ aceit.}} + 0.3 * \% \text{ Horas em UDI}}{100}$$

imperativa à promoção do conforto no ambiente, uma vez que tem grande influência na qualidade do ambiente no período noturno e maior impacto no consumo energético. A iluminação natural recebeu um menor valor de ponderação por estar condicionada à luz do dia e, portanto, não ser aplicável ao período de ocupação noturna, o que limita sua atuação na promoção do conforto. Ainda, com advento da iluminação de LED, reduziu-se significativamente o consumo energético vinculado a iluminação.

Contudo, tanto o desempenho térmico, como o luminoso são relevantes à saúde e ao bem-estar do usuário e é importante que um nível mínimo de cada seja alcançado. Para tanto, definiu restrições quanto às condições de desconforto toleráveis para validação do desempenho integrado resultante da função objetivo. Tais restrições foram aplicadas para seleção dos cenários válidos que construirão as matrizes de decisão. Descartou-se os cenários que não atenderam as restrições impostas individualmente para o desempenho térmico e para o desempenho lumínico, conforme regras a seguir:

Tabela 6.4 | Restrições impostas à Função Objetivo

RESTRIÇÕES DE DESEMPENHO LIMITES MÁXIMOS DE DESCONFORTO TOLERÁVEIS			
CONFORTO TÉRMICO		CONFORTO LUMINOSO	
CONDIÇÃO	LIMITE MÁXIMO	PARÂMETROS	CONFIGURAÇÕES BASE
PERCENTUAL DE HORAS DE DESCONFORTO POR CALOR	MÁXIMO DE 20%	PERCENTUAL DE HORAS ABAIXO DE 100LUX	MÁXIMO DE 20%
PERCENTUAL DE HORAS DE DESCONFORTO POR FRIO ADAPTATIVO (TCONF-5.25)	MÁXIMO DE 20%	PERCENTUAL DE HORAS ACIMA DE 3000LUX	MÁXIMO DE 20%

Nos capítulos seguintes, 7. "*Pós modelagem*" e 8. "*Discussão dos Resultados*" serão abarcados a aplicação da função objetivo e discussões acerca dos resultados obtidos a partir de seu uso. Não obstante, também se faz reflexões quanto aos pesos, analisando o impacto no desempenho integrado quando esses pesos são alterados e como estes podem traduzir o desempenho dos microapartamentos.

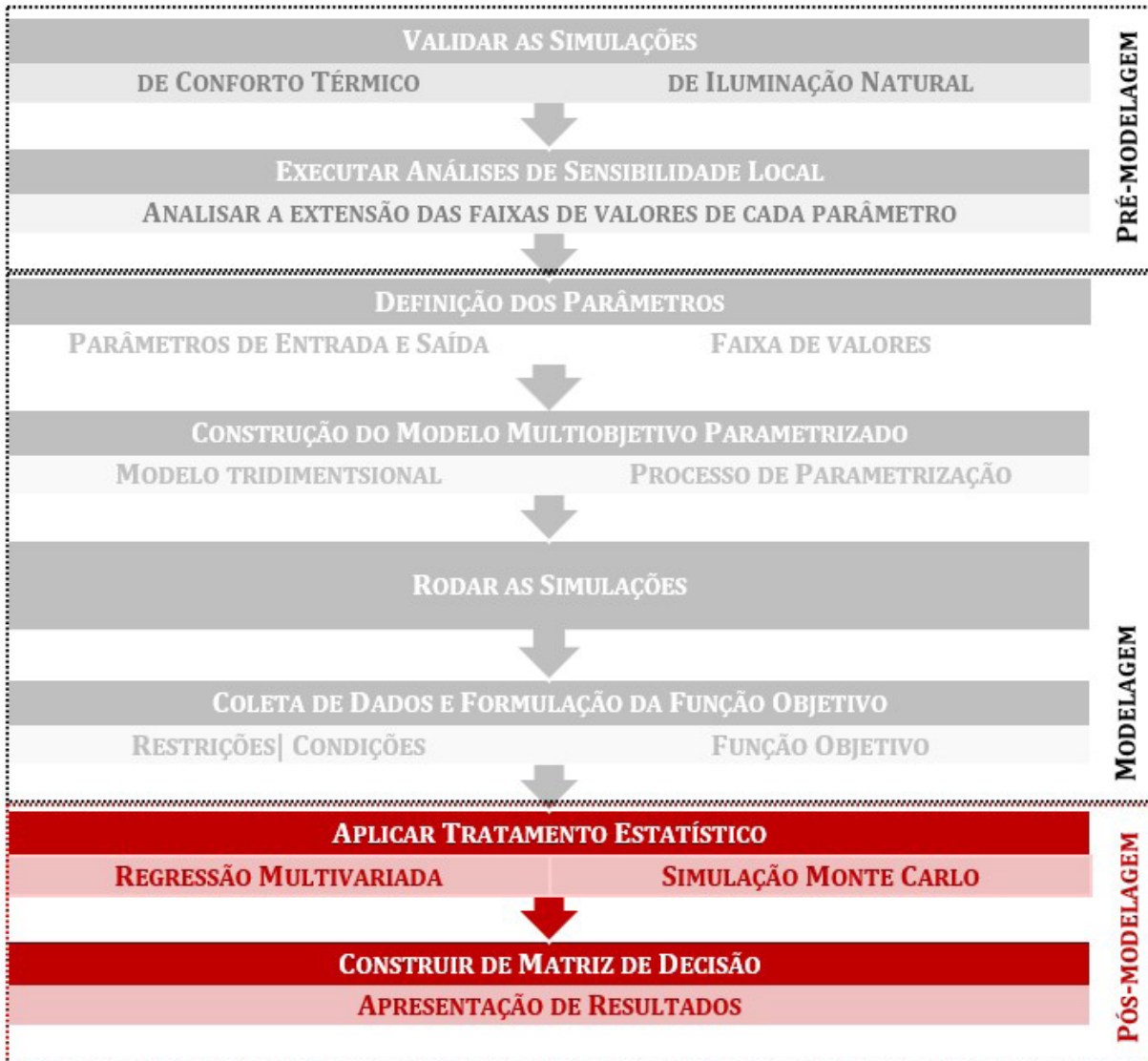


Figura 7.1 | Fluxograma das atividades de desenvolvimento da pesquisa - posmodelagem | Fonte: autoral

7.1. INTRODUÇÃO

A fase de pós-modelagem abarca o tratamento dos resultados e está organizada em duas grandes partes:

- **Parte 1: Tratamento Estatístico dos Dados**
- **Parte 2: Construção das Matrizes de Decisão**

O tratamento estatístico dos dados simulados ocorre por meio da aplicação de regressões multivariadas e análises de sensibilidade. O tratamento estatístico permitiu estudos exploratórios de forma estruturada do grande número de cenários derivados do total de combinações dos parâmetros variáveis. Tal etapa possibilitou identificar a relevância e as interações dos parâmetros de entrada e, conseqüentemente, orientar a construção das matrizes de decisão.

A etapa 2, Construção da Matriz de Decisão, focou no desenvolvimento das matrizes de decisões das soluções de conforto a serem aplicadas na etapa de concepção do projeto a partir dos resultados tratados na etapa 1. A matriz consiste na compilação dos resultados de forma gráfica e esquemática com o objetivo de explicitar o efeito das soluções arquitetônicas no desempenho termo-luminoso e assim orientar a tomada de decisão de projeto. Cada caso é constituído de duas matrizes levando em consideração um determinado nível de desempenho integrado. As matrizes são: 1. das relevâncias de soluções e 2. das interações das soluções.

7.2. ETAPA 1 | TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

O tratamento estatístico dos dados foi utilizado com o objetivo de facilitar e orientar a exploração do universo de soluções possíveis a partir da combinação dos parâmetros variáveis de entrada, que resultou em 73.728 cenários. Os dados foram organizados em três conceitos de agrupamento, como descrito abaixo, e suas análises foram executadas através do programa Minitab (www.minitab.com 2022). Esses agrupamentos auxiliam na avaliação dos resultados ao analisar as diferentes escalas e diversos conjuntos de parâmetros permitindo uma compreensão mais abrangente do impacto das estratégias.

- **Total:** considerando todos os 73.728 cenários
- **Ventilação:** cenários organizados em 2 partes pelo critério de ventilação (cruzado e simples)
- **Casos:** cenários organizados em 8 casos de acordo com a combinação dos critérios de ventilação e posição da unidade no edifício.

Foram executadas, sequencialmente, as regressões multivariadas, as simulações de Monte Carlo e os testes de sensibilidade, como ilustrado no fluxograma da figura 7.2. Fluxo de trabalho de análise de dados semelhante ao aplicado em Ostergard *et al* 2016. As equações das regressões, as médias e os desvios padrões dos parâmetros de entrada são produtos das regressões e servirão de base para as simulações de Monte Carlo e, conseqüentemente, ao desenvolvimento das análises de sensibilidade.

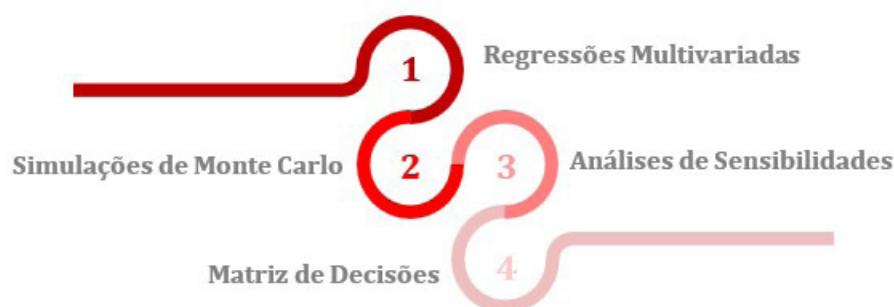


Figura 7.2 | Fluxograma do tratamento estatístico | Fonte: autoral

7.2.1. REGRESSÕES MULTIVARIADAS

As regressões multivariadas determinam uma equação que exprime a relação entre as variáveis, permitindo identificar as correlações dos parâmetros de entrada e de saída, além de atestar a relevância estatística dos dados. Todas as regressões realizadas obtiveram valores de ρ inferior a 0.05, atestando que a relação entre as variáveis de entrada e de saída é estatisticamente significativa. Quanto aos valores de R-quadrado, que é um indicado que expressa o quanto os dados de saída podem ser explicados pela função, variaram entre 0.75 e 0.48. Os mais baixos foram resultantes das regressões dos cenários em que havia ventilação cruzada e os mais elevados aos com ventilação simples.

Como dado de saída a ser considerado foi definido o desempenho integrado e os de entrada, todos os nove parâmetros variáveis (ventilação, posição, orientação, entorno, wwr, pé-direito, profundidade de planta, sombreamento e massa). Ainda, além das informações que abastassem as simulações de Monte Carlo, as regressões também permitiram as análises das correlações dos parâmetros por meio dos valores dos coeficientes padronizados da regressão (SRC), impacto no R-quadrado quando a variável é adicionada e do gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.

OS COEFICIENTES PADRONIZADOS DA REGRESSÃO (SRC E SRRC) determinam quais variáveis são as mais relevantes ao modelo, ao padronizar os valores para todos os seus preditores contínuos (parâmetros de entrada). O método aplicado para a padronização foi a subtração da média de cada preditor e a divisão do desvio padrão de cada preditor. Este método centraliza e dimensiona as variáveis (www.minitab.com 2022). Barras mais longas têm maior impacto no desempenho integrado e parâmetros a direita afetam positivamente o desempenho integrado e a esquerda, negativamente.

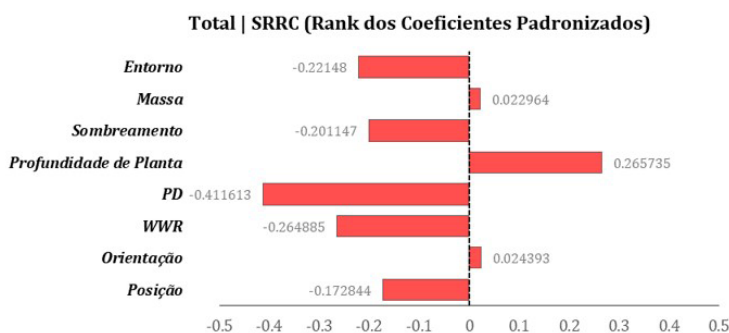
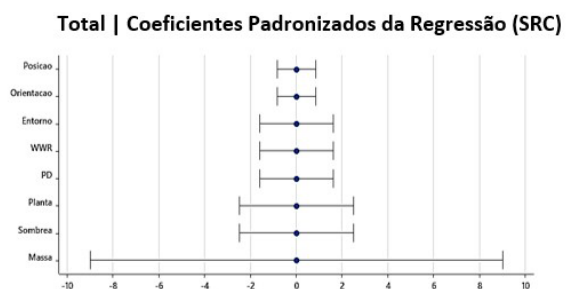


Figura 7.3 | Exemplos de Rank dos Coeficientes padronizados (SRRC) e dos Coeficientes Padronizados da Regressão (SRC) | Fonte: autoral



MUDANÇA NO R-QUADRADO calcula o aumento no R-quadrado que cada variável produz quando é adicionada a um modelo que já contém todas as outras variáveis. Como a mudança na análise do R-quadrado trata cada variável como se fosse a última inserida no modelo, a mudança representa a porcentagem de variância explicada por uma variável que não pode ser explicada por outras variáveis do modelo (www.minitab.com 2022).

Nesse caso, o programa minitab permite a regressão de no máximo cinco preditoras e por isso realizou-se tal regressão apenas no agrupamento “casos”, considerando como preditoras os parâmetros de arquitetura (wvr, pé-direito, profundidade de planta, sombreamento e massa). Tal premissa foi adotada pois os demais parâmetros são relacionados às características de implantação e urbanísticas, que tendem a ser impostas ao projeto e apresentam menor grau de alteração por parte dos projetistas.



Figura 7.4 | Exemplos de Mudança no R-quadrado | Fonte: autoral obtido pelo programa minitab

Além da mudança no R-quadrado, a regressão multivariada também gera gráficos de efeitos em que se ilustra a interação entre os parâmetros e como esta afeta o desempenho integrado. São dois gráficos, de interação e dos efeitos principais individualizados. Nos gráficos de interação (figura 7.5) há menor interação entre as variáveis de entrada quando as linhas tendem a ser paralelas. Linhas muito próximas, mesmo que apresentem alguma interação têm comportamento semelhante em relação às alterações no desempenho integrado (eixo y).

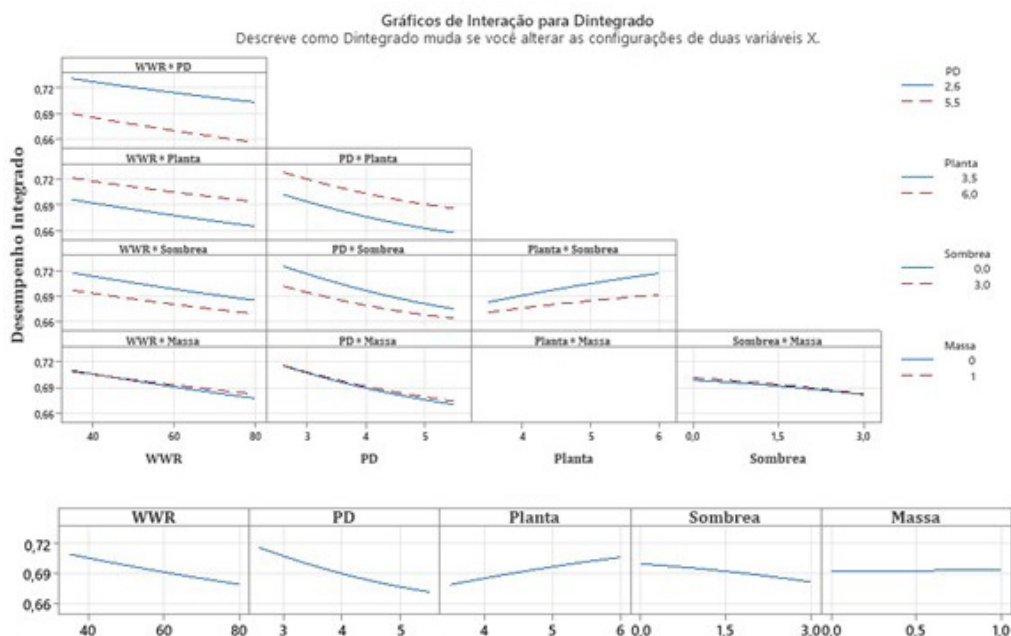


Figura 7.5 | Gráficos da Regressão Multivariada Impacto e Interação | Fonte: autoral obtido pelo programa minitab

GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS mostra os valores absolutos dos efeitos padronizados desde o maior efeito até o menor efeito. Também representa graficamente a linha de referência para indicar quais efeitos são estatisticamente significantes. No gráfico de Pareto, as barras que cruzam a linha de referência são estatisticamente significativas e permite determinar a magnitude e a importância dos efeitos (www.minitab.com 2022). O gráfico de Pareto não possibilita determinar quais efeitos aumentam ou diminuem a resposta (desempenho integrado), para tanto é necessário analisar os coeficientes padronizados de regressão.

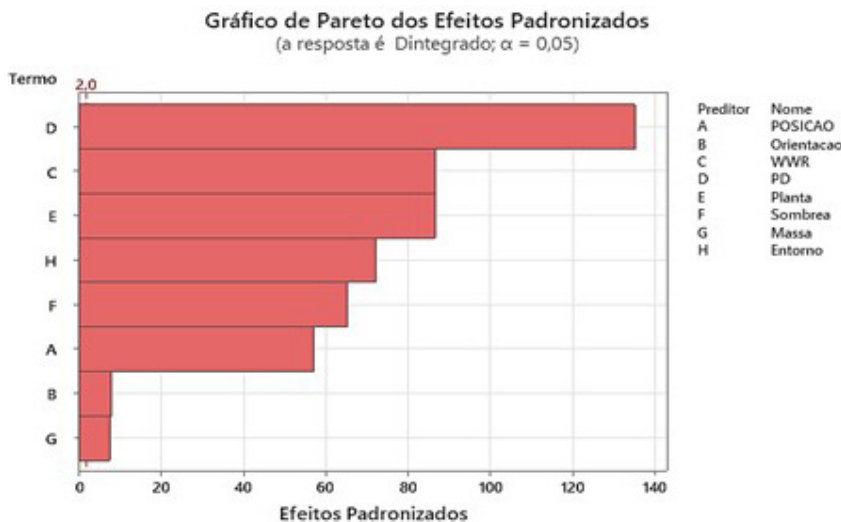


Figura 7.6 | Gráficos de Pareto
| Fonte: autoral obtido pelo programa minitab

Por fim também foram realizadas análises estatísticas secundárias para explorar e compreender outras relações de causalidade e correlação, como de percentual horas de conforto e de UDI, temperatura operativa e efeitos de variação as ponderações dos índices a serem considerados na função objetivo que determina o desempenho integrados. Todos estes estudos serão apresentados e discutidos no capítulo “Discussão dos Resultados”.

7.2.2. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A simulação de Monte Carlo foi inventada por John Von Neumann e Stanislaw Ulam, na década de 1940, para melhorar a tomada de decisão. Os cientistas trabalhavam na bomba atômica calculando as probabilidades de um átomo de urânio em fissão causar uma reação de fissão em outro (www.ibm.com, 2022). Trata-se de uma técnica matemática especializada em calcular probabilidades confiáveis a partir de dados simulados, tendo a capacidade de realizar análise de sensibilidade ou de calcular a correlação de entradas.

As simulações de Monte Carlo fornecem valores esperados com base em equações que definem a relação entre as entradas (X) e as saídas (Y), nessa pesquisa tais dados de entrada são provenientes das regressões realizadas anteriormente. A simulação usa um modelo matemático do sistema, que permite explorar o comportamento do sistema por meio de um modelo de resultados possíveis, usando uma distribuição de probabilidade,

como uma distribuição uniforme ou normal, para qualquer variável que tenha incerteza inerente (www.ibm.com 2022). Ela, então, recalculará os resultados sucessivamente, cada vez usando um conjunto diferente de números aleatórios entre os valores mínimo e máximo (www.ibm.com 2022).

Nessa pesquisa, os parâmetros de entrada apresentam uma distribuição uniforme discreta, em que todos os valores do mesmo parâmetro possuem a mesma ocorrência. Assim, as informações iniciais fornecidas foram os limites (inferior e superior) de cada parâmetro de entrada e a equação resultante da regressão tendo como y o desempenho integrado. Quanto mais aderente as equações ao modelo, mais preciso são os resultados das simulações de Monte Carlo, contudo o objetivo não é numérico, mas a compreensão do comportamento e interação e, portanto, tais ferramentas são adequadas. Por fim, foram realizadas 100.000 interações, tendo como resposta um histograma e estatísticas sumárias, incluindo valores de saída esperados e uma estimativa de sua variabilidade, conforme ilustrado na (figura 7.7)

Tais resultados, além de fornecerem informações às análises de sensibilidade, demonstram a distribuição de resultados do desempenho integrado. No histograma e nos dados estatísticos é possível compreender qual o percentual de soluções que atende certo nível de desempenho integrado, quanto está fora desses limites.

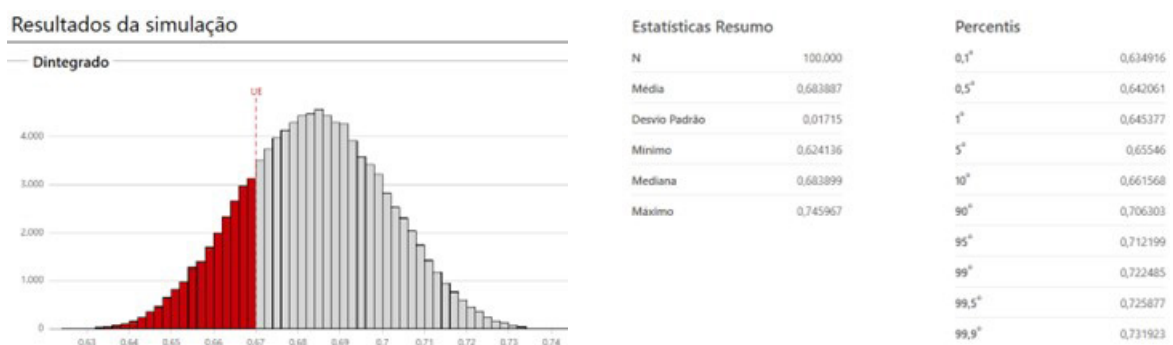


Figura 7.7 | Análises de Dados da Simulação de Monte Carlo | Fonte: autoral obtido pelo programa minitab

7.2.3. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Por fim, foram realizadas análises de sensibilidade que servem para identificar as entradas cuja variação tem maior impacto nas saídas principais e ajustes que possam contribuir para melhoria do sistema. As análises de sensibilidade são orientadas pelo gráfico que mostra como a porcentagem de saída que está fora da especificação muda com alterações dos desvios padrões de cada entrada.

As linhas inclinadas têm elevado efeito sobre a variabilidade das respostas, ao considerar a relação entre as alterações ao desvio padrão da entrada e o percentual fora da especificação. Linhas planas indicam parâmetros com pouco efeito nas respostas. A figura 7.8 demonstra o elevado efeito do entorno, do pé-direito (PD) e da planta no desempenho

integrado. Como um exemplo das análises de sensibilidade realizadas, ao aumentar o limite do WWR para 90%, o do P.D e do sombreamento para 6.0m observou-se uma mudança significativa nos resultados do desempenho integrado, como ilustrado na figura 7.9 O percentual de desempenho acima de 0.67 passou de 21.53% para 0,04%.

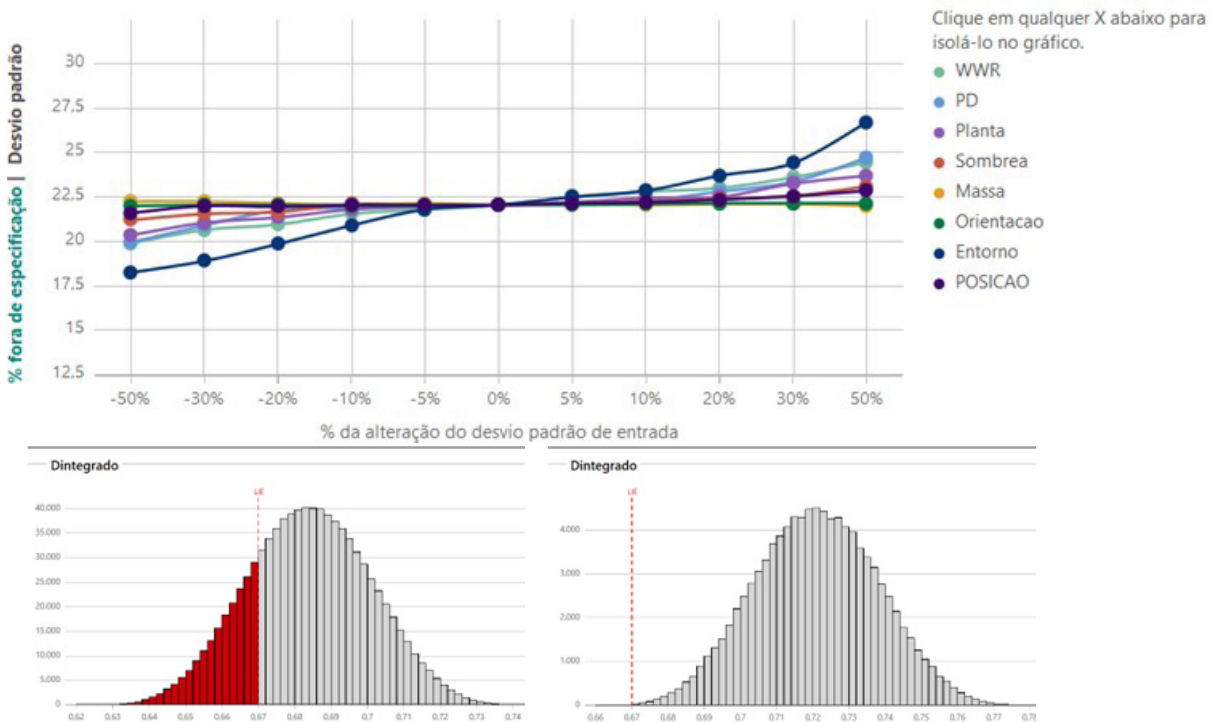


Figura 7.8 | Gráfico dos parâmetros para análise de sensibilidade global

Figura 7.9 | Histogramas comparativo dos resultados antes e após aplicação da análise de sensibilidade /
Fonte: autoral obtido pelo programa minitab

Não é objetivo da pesquisa a busca pelas soluções otimizadas, mas a partir das simulações de Monte Carlo e as análises de sensibilidade é possível uma otimização dos parâmetros, encontrando assim um conjunto de soluções com melhores desempenho integrado. Será apresentado na parte da Matriz de Decisão as soluções que melhor desempenharam para cada caso, mas mantendo as faixas de valores dos parâmetros variáveis que foram aplicadas na fase de modelagem.

7.3. ETAPA 2 | CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE DECISÃO

Após atestar estatisticamente a correlação entre os parâmetros de entrada (premissas arquitetônicas e de implantação) e o desempenho termo-luminoso, foi possível construir as matrizes de decisão das estratégias passivas, a serem aplicadas em etapas iniciais de projeto. As matrizes são condicionadas pela correlação das premissas arquitetônicas e de implantação (entorno e orientação) que definem o nível do desempenho integrado. Para tanto, elaborou-se duas matrizes de decisões, uma considerando o grau de relevância e outra considerando a interação entre as soluções arquitetônicas no desempenho integrado.

Ainda, para uma compreensão mais assertiva, organizou-se a apresentação das matrizes por casos, sendo estes em função da combinação dos parâmetros de posição da unidade no edifício e do tipo de ventilação, conforme descrito na tabela 7.1.

Tabela 7.1 | Quadro descritivo dos casos

VENTILAÇÃO SIMPLES		VENTILAÇÃO CRUZADA	
CASO	POSIÇÃO DA UNIDADE NO EDIFÍCIO	CASO	POSIÇÃO DA UNIDADE NO EDIFÍCIO
CASO 1	COBERTURA - QUINA	CASO 5	COBERTURA - QUINA
CASO 2	COBERTURA - MIOLO	CASO 6	COBERTURA - MIOLO
CASO 3	ENTRE PAVIMENTOS - QUINA	CASO 7	ENTRE PAVIMENTOS - QUINA
CASO 4	ENTRE PAVIMENTOS - MIOLO	CASO 8	ENTRE PAVIMENTOS - MIOLO

Em relação ao nível de desempenho integrado, estabeleceu-se um nível mínimo a ser alcançado, sendo este valor de 0.67. Tal limite representa o valor máximo de desempenho integrado em que há ocorrência de todas as condições de implantação (todas as faixas de valores de entorno, de orientação e de posição). Ressalta-se que para os parâmetros arquitetônicos há soluções que não irão existir dentre os cenários de desempenho integrado acima de 0.67. Quanto aos resultados das matrizes serão discutidos no capítulo 8 "*Discussão dos Resultados*".

Ainda, como explicitado no capítulo 6 "*Fase de Modelagem*", o desempenho integrado é resultante da função objetivo que integra o desempenho térmico e luminoso, após suprimir os cenários que não atenderam as restrições de desempenho mínimo individual de térmica e de iluminação. Assim, o limite de 0.67 é aplicado ao universo de cenários válidos, após a eliminação dos cenários que não atenderam as restrições. Na tabela 7.2 apresenta-se o percentual de cenários com desempenho integrado válido acima de 0.67 por caso.

Tabela 7.2 | Percentuais de ocorrência de cenários válidos por casos

Percentual de ocorrência dos cenários em relação aos critérios de desempenho Integrado									
Desempenho Integrado (D.I)	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Todos
<i>D.I</i> válido	84%	85%	69%	69%	92%	90%	88%	70%	81%
<i>D.I</i> >0.67	69%	66%	60%	60%	61%	70%	34%	53%	58%

Em relação aos tipos de matrizes de decisão elaboradas, descreve-se a seguir cada uma, apresentando a estrutura e a metodologia aplicada. Tanto a matriz de relevância, quanto a de interação serão compiladas em apresentações de três páginas para cada caso. Nessas apresentações também é inserido os gráficos de regressões e os histogramas das simulações de Monte Carlo, como ilustrado a seguir.

MATRIZ DE RELEVÂNCIA | ESTRATÉGIAS PASSIVAS CASO 3



CASO 3 MATRIZ DE INTERAÇÃO | ESTRATÉGIAS PASSIVAS

Descreve como o desempenho Integrado muda quando há alterações de duas variáveis.

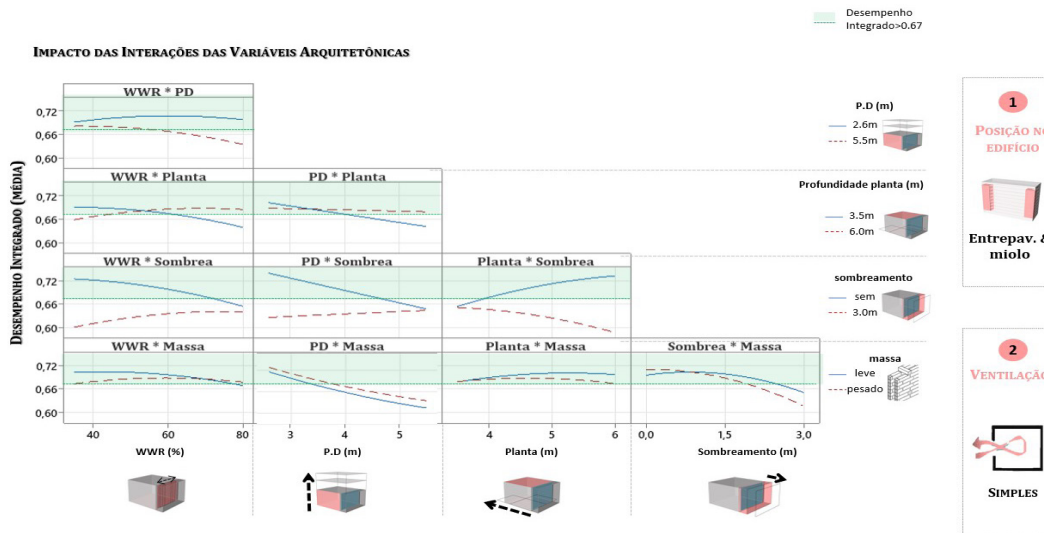


Figura 7.10 | Apresentação das Matrizes de decisão: Relevância e Interação | Fonte: autoral

7.3.1. MATRIZ DE DECISÃO DE RELEVÂNCIA

A matriz de decisão de relevância tem como objetivo expressar o grau de relevância de cada solução arquitetônica diante de uma determinada implantação (entorno e orientação) e, assim, orientar o projetista em suas tomadas de decisões. Para tanto, construiu-se uma matriz que correlaciona os parâmetros arquitetônicos (wwr, pé-direito, profundidade de planta, sombreamento e massa) e os de implantação (entorno e orientação), considerando apenas os cenários com desempenho integrado superior a 0.67, conforme representado na imagem 7.11

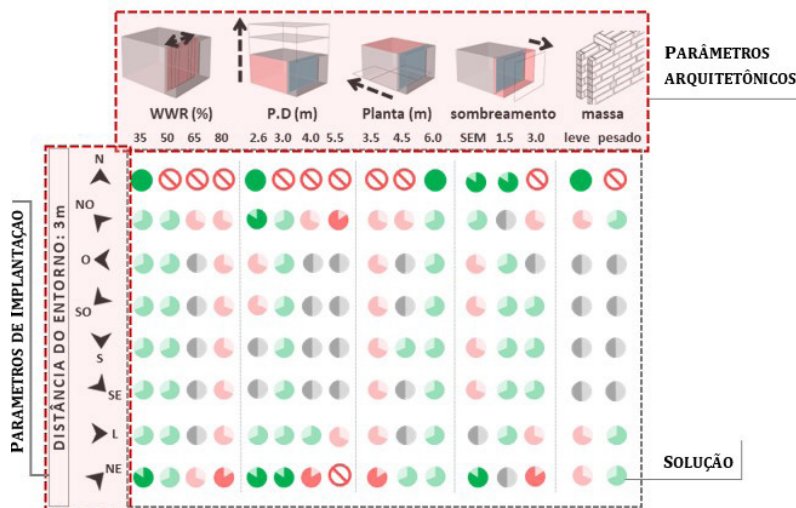


Figura 7.11 | Descrição da organização da matriz do grau de relevância | Fonte: autoral

O grau de relevância expressa a distância relativa que cada solução se encontra do percentual de ocorrência neutro, negativa ou positivamente. A neutralidade se dá quando todas as soluções que compõem um mesmo parâmetro arquitetônico apresentam o mesmo percentual de ocorrência, por exemplo o parâmetro WWR possui quatro soluções e sua neutralidade ocorre quando todas as soluções têm 25% de ocorrência. O percentual de ocorrência neutro (pn) é expresso por:

$$pn = 1 / (n^{\circ} \text{ de soluções})$$

onde: pn: percentual de ocorrência neutro

A tabela 7.3 apresenta os percentuais de ocorrência neutro e classifica os parâmetros de acordo com a suas quantidades de soluções.

Tabela 7.3 | Percentuais de ocorrência neutro de acordo com a quantidade de soluções de cada parâmetro

	Com 4 soluções	Com 3 soluções	Com 2 soluções
Parâmetros	WWR P.D	Planta Sombreamento	Massa
% de ocorrência neutro (pn)	25%	33,33%	50%

Quando há diferenciação entre estes percentuais, tem-se soluções mais relevantes do que outras. Optou-se por trabalhar com uma distância relativa porque os parâmetros arquitetônicos considerados na construção da matriz não apresentam a mesma quantidade de soluções. Assim, o grau de relevância é calculado pela equação a seguir:

$$\text{Grau de relevância} = ((\% \text{ de ocorrência}_x - pn)) / pn$$

sendo: % ocorrência: percentual de ocorrência de determinada solução.

Nº de soluções: número de soluções do parâmetro. pn: n percentual de ocorrência neutro.

Os graus de relevância são apresentados de forma gráfica, por meio de ideogramas redondos (harvey balls) coloridos que representam faixas de valores neutras, de redução ou de aumento da relevância de cada solução. A figura 7.12 ilustra a legenda dos ideogramas, explicitando a equivalência dos percentuais de ocorrência de cada parâmetro em relação aos valores do grau de relevância.

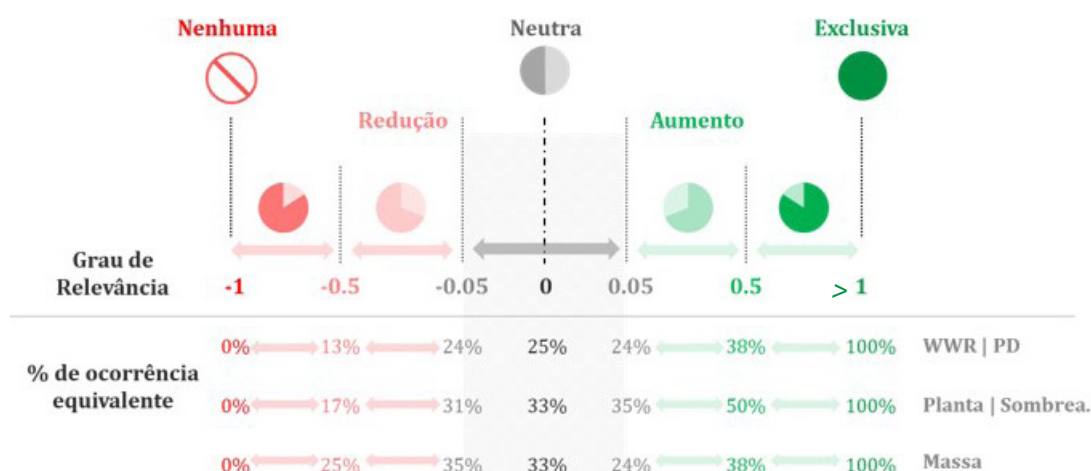


Figura 7.12 | Legenda explicativa dos ideogramas da Matriz de decisão do grau de Relevância | Fonte: autoral

A matriz permite identificar quais soluções são mais relevantes, quais devem ser evitadas e quais devem ser priorizadas para uma determinada condição de implantação, funcionando como uma cartilha orientativa das estratégias passivas de conforto no início do processo de projeto. Além disso e, provavelmente o mais importante, quais são soluções únicas (exclusivas, grau 1) e quais não existem (nenhuma, grau -1) e, portanto, sua escolha pressupõe um desempenho integrado inferior ao limite de 0.67. As soluções exclusivas são exceções, pois representam situações extremas em que somente uma única solução do parâmetro alcança o desempenho exigido para aquela condição de implantação.

Não obstante, para cada caso a matriz de relevância está organizada em quatro blocos de acordo com a variação de entorno, sendo possível compreender graficamente o impacto do entorno na flexibilidade das soluções. Há casos em que se observa um crescimento de soluções com graus de relevância mais extremos, -1 (sem ocorrência) ou 1 (somente estas, 100% ocorrência), conforme o distanciamento do entorno. Tais situações enfatizam o impacto do entorno, demonstrando situações em que o entorno se torna bastante restritivo às soluções, em outros há menor efeito imprimindo maior flexibilidade às soluções.

A matriz de decisão relevância tem caráter diagnóstico e orientativo, no entanto, não é possível observar o efeito de interação entre os parâmetros. Nela, o projetista poderá compreender o grau de flexibilidade e relevância das soluções diante das condições de implantação. Apenas a matriz de interação que fornecerá uma avaliação dos efeitos no desempenho integrado da interação entre duas soluções. É a partir da observação e entendimento de ambas que o projetista construirá uma tomada de decisão informada, compreendendo a tendência de desempenho do conjunto de soluções adotadas.

7.3.2. MATRIZ DE DECISÃO DE INTERAÇÃO

A matriz de interação é produto da regressão multivariada e apresenta em forma de gráfico os efeitos no desempenho integrado devido a interação entre duas soluções,

considerando todos os cenários validos. Esta matriz permite avaliar as alternativas considerando as interações entre as soluções e a tendência em melhorar ou piorar o desempenho. Os gráficos são construídos a partir de todo o universo de cenários validos e, portanto, a tendência dos efeitos das interações entre dois parâmetros já considerou os demais parâmetros. A matriz é piramidal composta por gráficos em que o eixo y representa o nível de desempenho integrado resultante da combinação de duas soluções, o eixo x é um parâmetro arquitetônico e as linhas outro parâmetro, como exemplificado na figura 7.13.

As linhas que tendem ao paralelismo apresentam menor interação, as que são inclinadas maior interação e as que apresentam mais de duas linhas é porque soluções de valores intermediários não estão entre os limites de valores, mas acima ou abaixo. Por fim, linhas sobrepostas é devido ao pouco impacto do parâmetro na definição do desempenho, ou seja, é um parâmetro irrelevante. Isto também é percebido na matriz de relevância quando todas as soluções do parâmetro estão concentradas na faixa de neutralidade, ideograma cinza.

Para a avaliação holística da solução a partir da matriz de interação, se faz necessário a análise da interação da solução com todos os parâmetros, dessa forma é possível o conjunto de soluções que melhor interagem obtendo um nível de desempenho mais elevado. A interpretação do gráfico é demonstrada na figura 7.13 e pode ser aplicado aos demais gráficos que compõe a matriz.

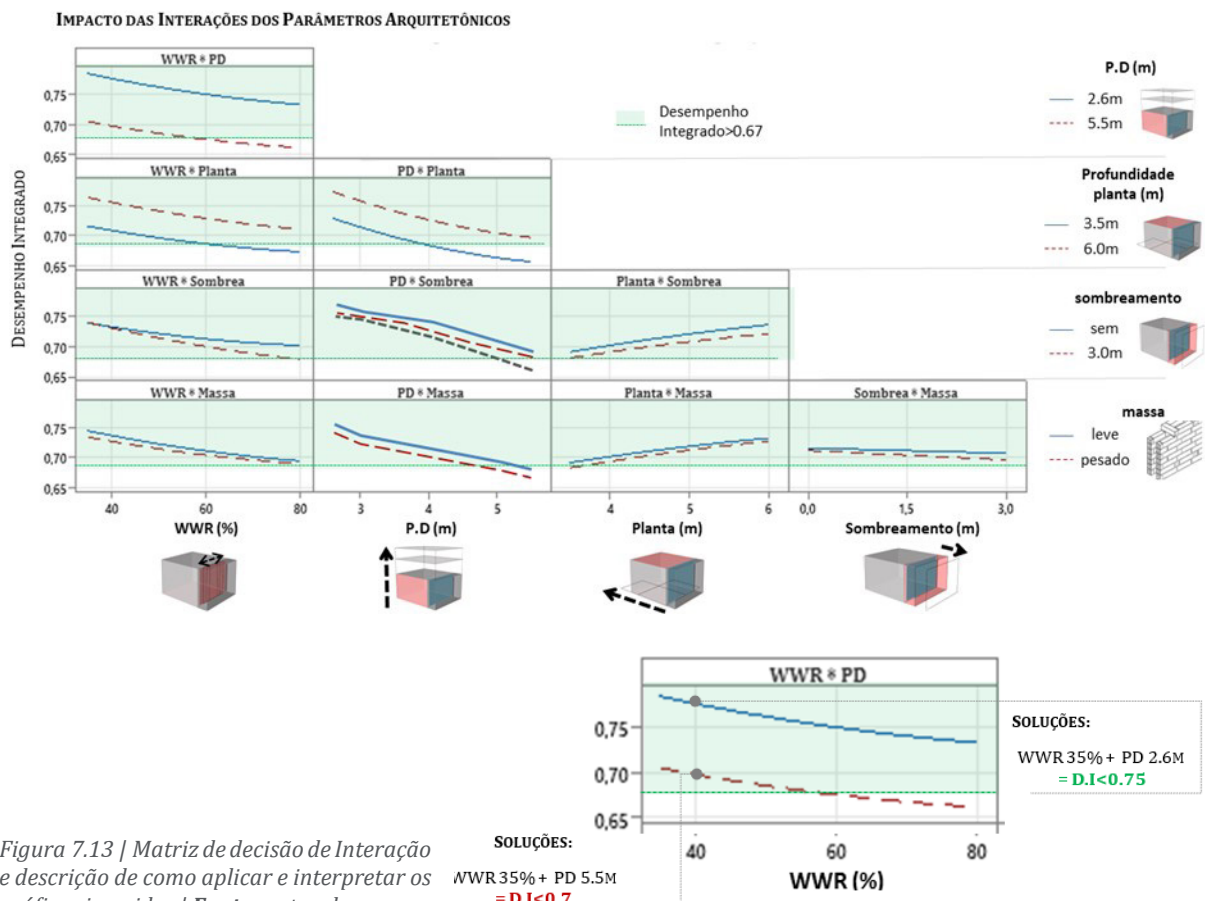


Figura 7.13 | Matriz de decisão de Interação e descrição de como aplicar e interpretar os gráficos inseridos | Fonte: autoral

7.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo discorreu acerca dos métodos e tratamentos de dados aplicados aos resultados obtidos na fase de modelagem. A fase de Pós-modelagem tem como objetivo a construção de avaliações que permitam correlacionar os parâmetros de entrada aos resultados e identificar a interação entre eles e suas relevâncias. Assim, fornecer aos projetistas avaliações e análises de resultados que possam orientá-los na tomada de decisão nas etapas iniciais do projeto.

Não obstante, o tratamento de dados possibilitou de diversas outras análises dos resultados considerando diferentes contextos, como futuro e arquitetônico, ou abordagens, como temperatura e iluminância. No próximo capítulo as discussões de resultados são abarcadas e tais análises serão exploradas.

O tratamento estatístico dos dados simulados ocorre por meio da aplicação de regressões multivariadas e análises de sensibilidade. O tratamento estatístico permitiu estudos exploratórios de forma estruturada do grande número de cenários derivados do total de combinações dos parâmetros variáveis. Tal etapa possibilitou identificar a relevância e as interações dos parâmetros de entrada e, conseqüentemente, orientar a construção das matrizes de decisão.

A etapa 2, Construção da Matriz de Decisão, focou no desenvolvimento das matrizes de decisões das soluções de conforto a serem aplicadas na etapa de concepção do projeto a partir dos resultados tratados na etapa 1. A matriz consiste na compilação dos resultados de forma gráfica e esquemática com o objetivo de explicitar o efeito das soluções arquitetônicas no desempenho termo-luminoso e assim orientar a tomada de decisão de projeto. Cada caso é constituído de duas matrizes levando em consideração um determinado nível de desempenho integrado. As matrizes são: 1. das ocorrências de soluções e 2. das interações das soluções.

8.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo abará a discussão de resultados e análises dos resultados obtidos na fase de pós modelagem, com ênfase no desempenho ambiental e na concepção do projeto levando em consideração cenários climáticos atuais e futuros. Assim, será possível a elaboração de reflexões críticas acerca da inserção de estratégias passivas para promoção do conforto do usuário e a sua extrapolação em diferentes contextos climáticos.

A discussão ambiental aborda a avaliação do desempenho integrado e as interações dos parâmetros de entrada. Além de análises individuais e comparativas do conforto térmico e luminoso por meio de índices de conforto, de métricas de iluminação natural e de variáveis ambientais como temperatura operativa e iluminância.

A abordagem projetual irá debruçar-se sobre os impactos das soluções arquitetônicas para o conforto termo-luminoso e a inserção de informações no início do processo de projeto para construção de tomadas de decisões orientadas. Ao compreender a relação imperativa do projeto na promoção do conforto e a atual complexidade do processo de projeto, busca-se discutir a integração das análises ambientais ao projeto em etapas iniciais, em que a oportunidade de alteração de projeto é maior e mais facilitada.

8.2. DISCUSSÃO AMBIENTAL

Foram realizadas simulações integradas de desempenho térmico e luminoso para avaliação ambiental de microapartamento com área interna de aproximadamente 20m². Conforme apresentado nos capítulos anteriores (6 e 7), buscou-se explorar a qualidade ambiental de inúmeros cenários decorrentes da combinação de um conjunto de estratégias passivas, podendo assim orientar a tomada decisão no início do projeto. Estes estudos permitiram diferentes escalas de análises, desde a totalidade dos cenários simulados até a organização em categorias com ênfase na interação entre entradas e saídas ou nos efeitos isolados de térmica ou de lumínico.

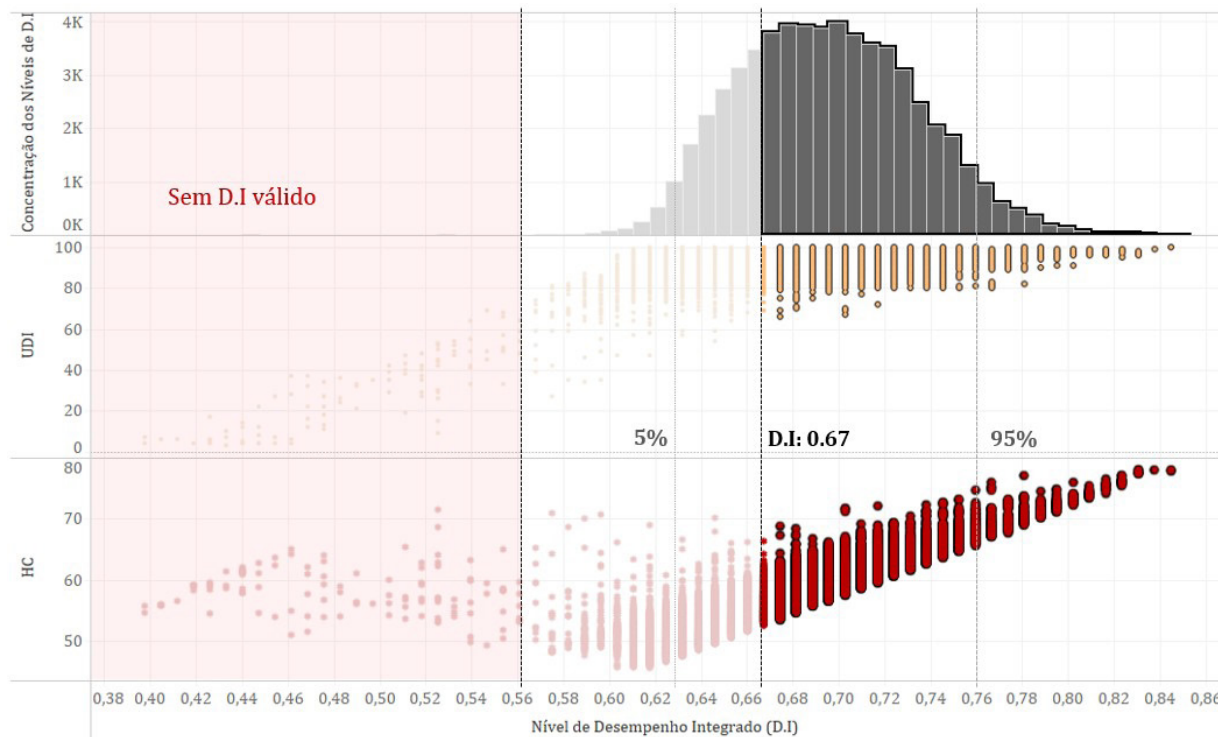
Ao considerar a totalidade dos cenários, observa-se a distribuição dos níveis de desempenho integrado concentrada entre 0.63 (percentil 5) e 0.76 (percentil 95). O máximo de desempenho integrado obtido foi de 0.85 e o mínimo de 0.56, sendo que 58% dos resultados estão acima de 0.67, limite considerado para a construção das matrizes de decisão. Tais resultados demonstram a elevada capacidade das estratégias passivas, quando aplicadas adequadamente, em promover o conforto do usuário e minimizar a dependência em sistemas ativos.

O desempenho integrado busca valorar os conjuntos de soluções por meio de uma equação que compile térmica e iluminação natural em um único índice. Entretanto, a avaliação integrada do desempenho térmico e luminoso é de difícil percepção, uma vez

que conjuga disciplinas que podem levar a soluções antagônicas. No contexto climático da cidade de São Paulo, a permeabilidade à luz natural no ambiente interno pode acarretar o aumento do ganho solar ou a diminuição de massa térmica, gerando prejuízo ao conforto térmico. Já a atenuação do ganho solar ou o aumento da massa pode proporcionar uma distribuição não homogênea da luz natural ou até a sua insuficiência.

Dessa forma, iniciou-se a discussão dos resultados pela relação entre essas duas variáveis e seus efeitos na composição do desempenho integrado. O gráfico 8.1, correlaciona os percentuais de UDI e de horas de conforto (HC) com a concentração dos níveis de desempenho integrado (D.I), considerando a totalidade dos cenários simulados (amostra de 73.728).

Gráfico 8.1 | Correlação entre Desempenho Integrado (DI), Luminosos (UDI) e Térmico (Horas de Conforto - HC)

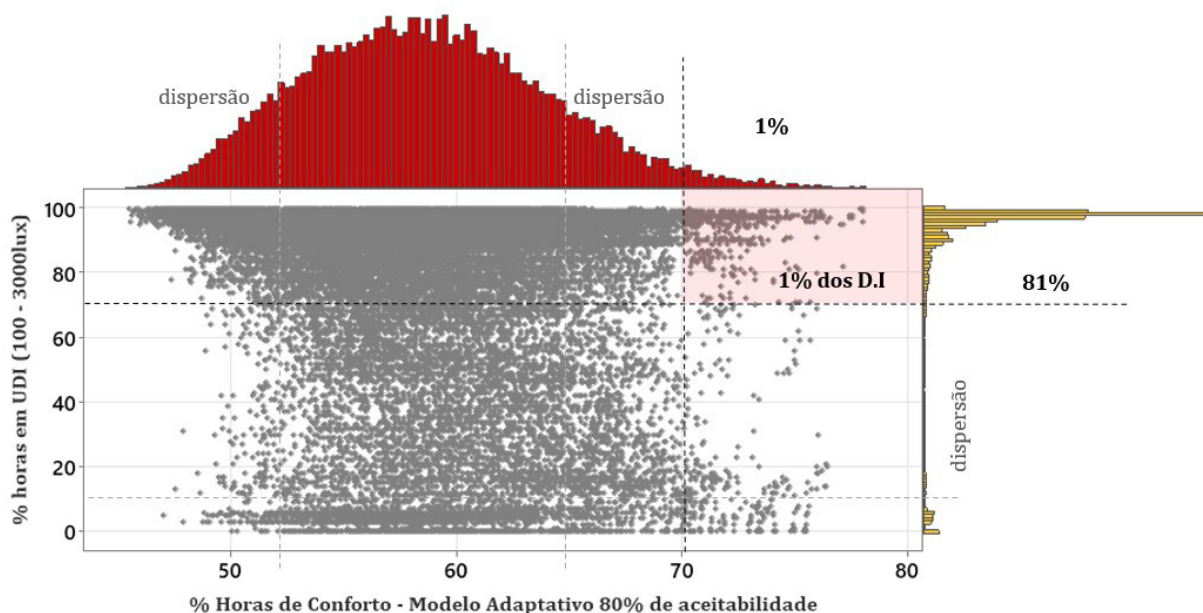


Observa-se uma maior ocorrência de valores mais elevados de UDI do que de horas de conforto, apenas 1% do desempenho integrado apresenta horas de conforto superior a 70%. Em contrapartida, 81% possuem UDI superior a 70%. Tais resultados também indicam uma maior sensibilidade da luz natural ao apresentar variações de valores mais extremas entre alguns conjuntos de soluções, alterando de 0 a 100% de horas dentro da faixa de UDI. Por outro lado, percebe-se a resiliência em alterar o percentual de conforto térmico, que no pior dos cenários apresentou 45% de horas ocupadas em conforto e, no melhor, 78%.

É importante ressaltar que o índice de térmica e a métrica de iluminação natural consideraram horas ocupadas, porém o de iluminação apenas a ocupação diurna, como já explicitado. Assim, os resultados reforçam a relevância do desempenho térmico na

formatação do conforto do usuário em espaços residenciais. Outra análise realizada foi a relação entre os índices de iluminação (UDI) e o de térmica (Horas de Conforto – 80% de aceitabilidade), conforme gráfico 8.2.

Gráfico 8.2 | Distribuição e dispersão dos percentuais de horas em UDI e em conforto térmico (HC)



O gráfico demonstra a concentração de UDI nas extremidades e uma maior dispersão no meio, entre 20% e 70%. Na térmica há uma inversão de comportamento, a distribuição concentra-se entre 51% e 65% e a dispersão se dá nas extremidades. Esse comportamento dos resultados indica que os conjunto de parâmetros testados influenciam significativamente a iluminação natural, sendo positivo em 81% dos cenários. Por outro lado, há uma parcela dos cenários que apresentam soluções inadequadas à iluminação natural, com percentuais abaixo de 20% anual. A maioria dos cenários abaixo de 20% de horas em UDI (100-3000lux) apresentaram insuficiência de luz, ou seja, valores aquém a 100 lux.

Reforçando o impacto das soluções e a sensibilidade do desempenho da luz natural, a maioria dos cenários que não atenderam as restrições da função objetivo foi pela iluminação natural, apenas 0.2% foi por térmica, conforme demonstrado na tabela 8.1. Apesar da térmica ser a mais preponderante no valor do desempenho integrado, a iluminação natural foi determinante na validação dos cenários, 19% do total foi desconsiderado devido às restrições de iluminação.

Tabela 8.1 | Distribuição do Desempenho Integrado por casos

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Total
<i>D.I</i> válido	84%	85%	69%	69%	92%	90%	88%	70%	81%
<i>D.I</i>>0.67	68%	65%	57%	57%	60%	69%	34%	52%	58%
<i>D.I</i> Fora Térmica	0%	0%	1%	0.1%	0%	0%	0%	0.1%	0.2%
<i>D.I</i> Fora Natural	15%	14%	30%	30%	8%	9%	11%	29%	19%

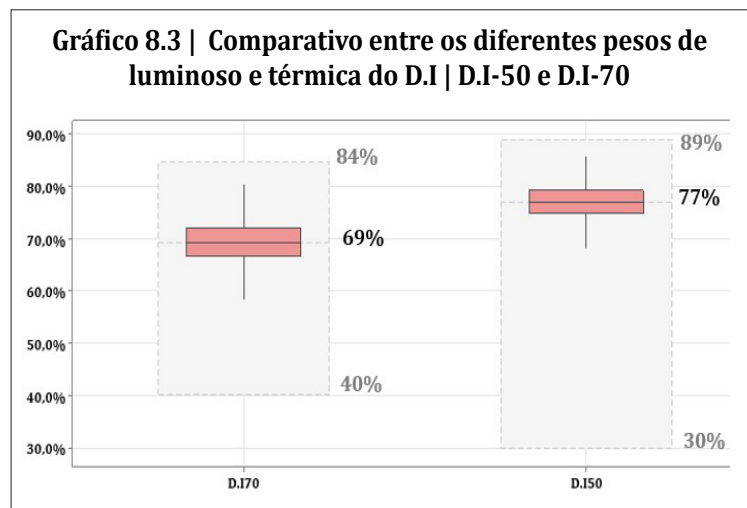
Ainda em relação à interação da térmica e da iluminação natural no desempenho integrado, realizou-se uma análise comparativa variando o peso entre térmica e iluminação natural da função objetivo. No estudo de D.I-50 manteve-se as restrições, mas nesse caso a função objetivo seguiu a equação abaixo para avaliação do desempenho integrado:

$$D.I_{50} = \frac{0,5 * \% \text{ horas em UDI} + 0,5 * \% \text{ de Horas em Conforto}}{100}$$

Comparou-se a situação original (D.I70), em que térmica tem peso de 0.7 com a situação em que os pesos das disciplinas de térmica e iluminação são equiparados (D.I50) e observa-se uma mudança significativa na amplitude dos resultados. Isto ocorre devido à maior variação dos resultados de iluminação em que para D.I50 há uma amplitude entre 30% e 89%, já para D.I70, entre 40% e 84%. O aumento da relevância da iluminação também refletiu na concentração dos níveis de desempenho integrado, em D.I50 a concentração encontra-se na faixa de 75%-80%, em D.I70, entre 65% e 75%.

Contudo, essa alteração nos valores do nível de desempenho pode ser interpretada como uma melhoria artificial do desempenho integrado. O que ocorre é um deslocamento vertical dos resultados devido a maior ponderação da iluminação natural, mas não uma melhoria real do desempenho. Os níveis de D.I50 ficam próximos aos valores de UDI, mas superiormente distantes das horas de conforto. Assim, entende-se que para esta pesquisa a métrica de desempenho integrado com maior relevância de térmica é mais adequada. Os níveis de D.I70 tendem a valores mais próximos aos verificados em térmica e um pouco inferior aos de iluminação.

Buscou-se compreender não apenas os percentuais de horas dentro das métricas e índices, mas também os que ocorrem fora. Em relação a térmica esse entendimento passa pela avaliação dos percentuais de desconforto e, para iluminação, pelos percentuais abaixo de 100 lux, acima de 3000 lux e cDA300. Os gráficos 8.4 e 8.5 apontam a tendência de desconforto por frio e por calor, e a insuficiência de iluminação natural.



Mesmo considerando a faixa de desconforto adaptada (conceito explicitado no item 6.2.2 do capítulo de modelagem), o desconforto por frio é mais significativo do que por calor. Observa-se que o desconforto por frio adaptado se concentra entre 3% e 10%, enquanto o por calor está entre 1.2% e 4%. A máxima de desconforto por calor é ligeiramente superior que por frio, sendo 22% e 19% respectivamente.

Gráfico 8.4 | Distribuição dos desconforto por calor e por frio

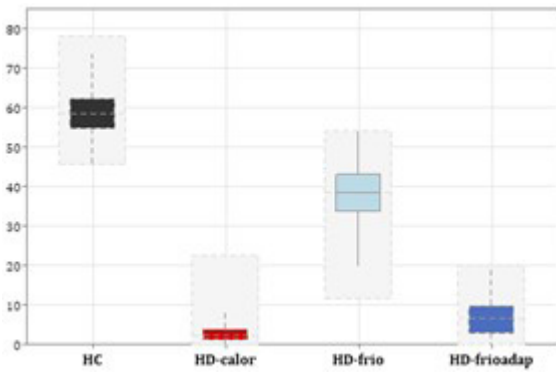
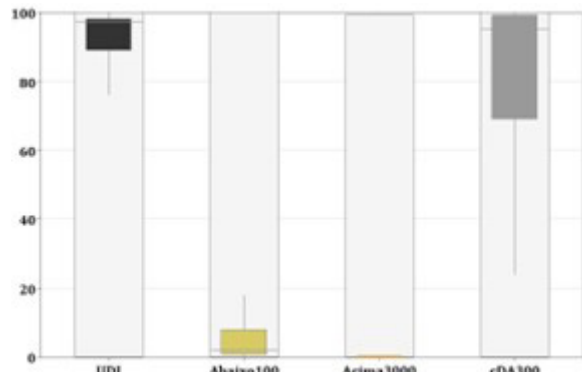


Gráfico 8.5 | Distribuição dos desconforto luminoso (abaixo de 100lux e acima 3000lux)



Quanto ao desempenho luminoso, o desconforto ocorre majoritariamente em função da insuficiência de luz, ou seja, abaixo de 100 lux. Apenas 5% dos cenários possuem mais de 20% de horas acima de 3000lux. Por fim, ao analisar a métrica cDA (continuos Daylight Autonomous), que mensura o percentual da autonomia da luz diurna, os resultados indicam uma autonomia bastante elevada da maioria dos cenários.

Ainda considerando a totalidade dos cenários, avaliou-se também a relevância e a interação dos parâmetros de entrada. Como explicitado no capítulo de pós-modelagem, para avaliação desse fenômeno foi aplicado o tratamento estatístico. Todos os parâmetros de entrada apresentaram algum grau de relevância na formatação do desempenho integrado, sendo o pé-direito o mais preponderante. Entretanto, os parâmetros que afetam tanto área de vidro quanto volume do ar interno foram o que demonstraram maior efeito no desempenho integrado, conforme indicado no gráfico 8.6.

Outro parâmetro importante é a ventilação, sendo o quarto mais impactante, pois ao alterar o tipo de ventilação de simples para cruzada, modifica-se também a área de vidro. A abertura oposta está locada próxima ao teto e tem 30% da área da abertura principal, esta

Gráfico 8.6 | Gráfico de Pareto do Impacto dos Parâmetros

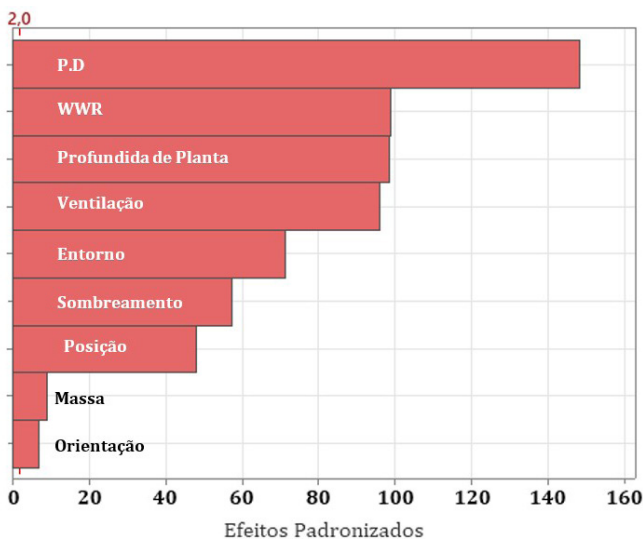
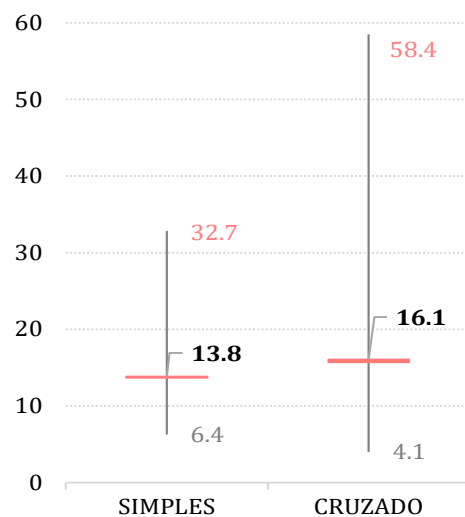


Gráfico 8.7 | Máximas, Média e Mínimas das Taxas de Renovação de Ar por hora (ACH)



disposição influencia tanto a movimentação de ar, quanto a penetração da luz, tendendo a promover uma distribuição mais homogênea. No gráfico 8.7 é demonstrado a alteração na taxa de renovação de ar devido ao tipo de ventilação.

O efeito adverso de duas aberturas para promoção da ventilação cruzada é o aumento da área de vidro e, conseqüentemente, a diminuição da massa e o potencial de aumento dos ganhos solares, principalmente em ambientes compactos como os avaliados. Em relação à iluminação natural, intensifica-se a possibilidade de ofuscamento por excesso de luz, em especial nos cenários com pouco sombreamento.

Pela análise do SRRC, a massa e a orientação são os parâmetros que exercem pouca influência no desempenho integrado quando comparado aos demais. Os gráficos 8.8 e 8.9 dos efeitos padronizados permitem aferir a relevância dos parâmetros no resultado, mas não indicam se as alterações dos parâmetros geram impactos positivos ou negativos no desempenho integrado. O Rank dos coeficientes padronizados da totalidade dos cenários (SRRC) indicou que quatro dos nove parâmetros de entrada afetaram negativamente o desempenho integrado. Além do desempenho integrado, também foi obtido o SRRC considerando apenas a térmica (horas de conforto) e a Iluminação natural.

Gráfico 8.8 | SRRC do Desempenho Integrado - Totalidade dos cenários

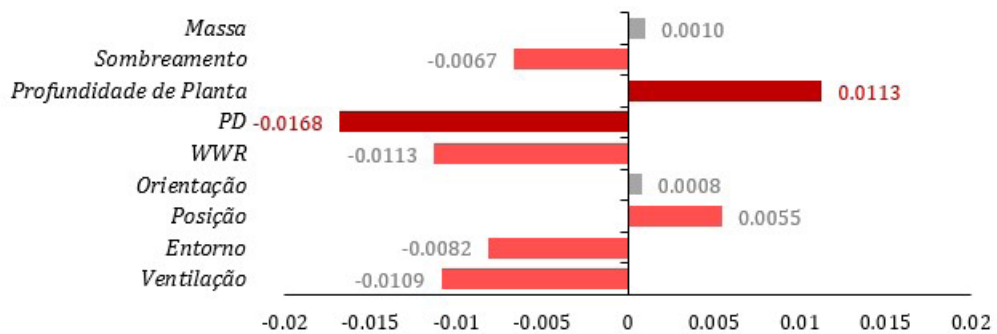
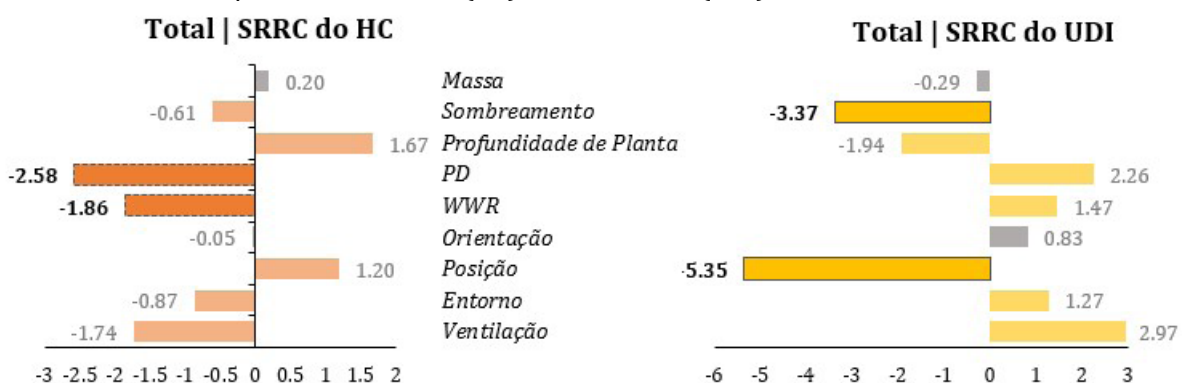


Gráfico 8.9 | SRRC de Térmica (HC) e de luminoso (UDI) - Totalidade dos cenários



Inicialmente, ao comparar os SRRC de térmica (HC) e de iluminação (UDI) afere-se a inversão no sentido do efeito de quase todos os parâmetros, com exceção do sombreamento. Esta primeira consideração indica o impacto antagônico entre as soluções dependendo da avaliação a ser averiguada. A incidência da luz natural está intrinsecamente correlacionada a exposição solar e em espaços compactos em climas subtropicais o aumento do acesso

ao céu e ao sol tende a propiciar o sobreaquecimento devido aos ganhos solares. Também observado um efeito adverso do aumento da área de vidro no desconforto por frio, devido à dificuldade de conservação de calor interno nos cenários com elevado WWR durante os períodos de inverno e noturno.

Para a térmica os parâmetros mais relevantes são o pé-direito e o percentual de vidro na fachada (WWR) e em terceiro a ventilação. São parâmetros imperativo a movimentação de ar e à exposição solar e quanto maior a área de vidro pior é o conforto térmico. Para iluminação todos os parâmetros apresentaram coeficientes mais elevados indicando um maior impacto no resultado do UDI do que o percebido em térmica. Estes resultados afirmam a sensibilidade do desempenho luminoso às variações dos parâmetros considerados no modelo. Quanto a relevância para iluminação, os parâmetros relacionados a obstrução são o que mais afetam o UDI, ou seja, sombreamento e a posição da unidade no edifício. Os parâmetros relacionados à área de vidro também têm relevância significativa para a iluminação, mas não são os mais impactantes.

Não obstante, as interações entre os parâmetros são demonstradas por meio dos gráficos de interação provenientes da regressão multivariada e pelos mapas de calor. Foram realizadas duas regressões multivariadas, uma considerando os parâmetros de implantação (posição, entorno e orientação) e de ventilação e, outra considerando os parâmetros arquitetônicos (massa, PD, planta, sombreamento e WWR).

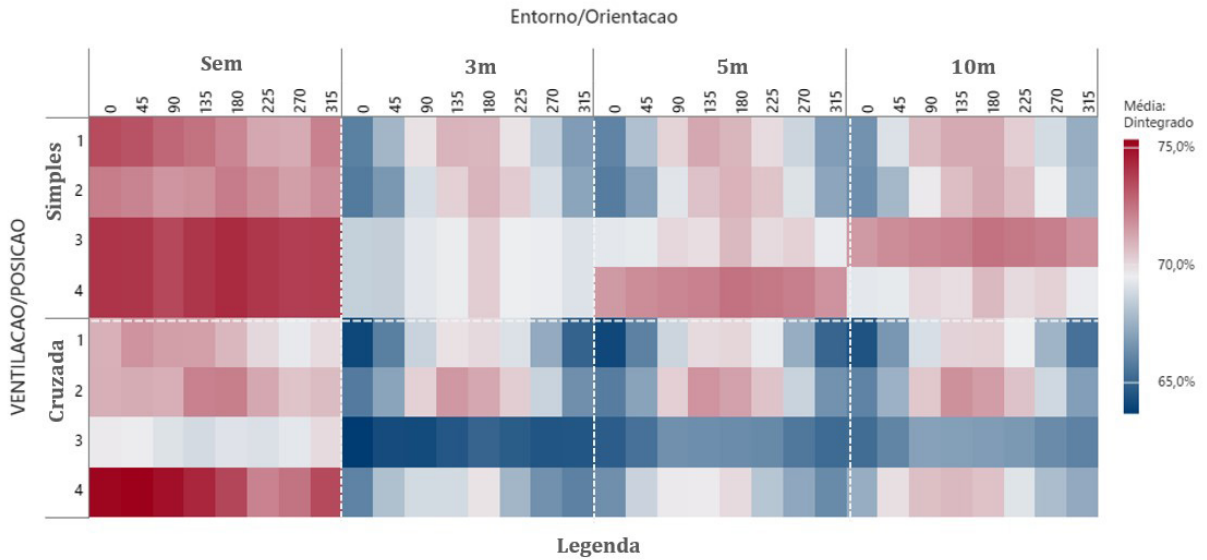
Os gráficos de interação da regressão multivariada dos parâmetros de implantação (posição, entorno e orientação) demonstraram a elevada interação da ventilação - posição, posição - orientação e ventilação - orientação. Contudo, o entorno é o parâmetro de implantação que apresenta maior impacto no desempenho integrado, mesmo não tendo grande interações com os demais parâmetros. Esse efeito é afirmado nos gráficos anteriores e no mapa de calor a seguir.

De acordo com os gráficos (8.10 e 8.11), o entorno é uma condição de projeto que afeta substancialmente as tomadas de decisões em relação ao conforto termo luminoso e deve ser avaliado cuidadosamente. O código de obras em vigência na cidade de São Paulo permite construções bastante próximas, o que implica o aumento da obstrução, reduzindo o acesso ao sol e ao céu. Atualmente, frente às questões ambientais e de mobilidade, tem-se impulsionado o adensamento urbano buscando cidades mais compactas. Entretanto, é necessário formular instrumentos urbanísticos que garantam o acesso ao sol e ao céu para que o conforto do usuário não seja comprometido devido à obstrução do entorno.

Os resultados demonstraram a necessidade de tais políticas públicas, visto que a obstrução de entorno não afetou apenas a iluminação natural, mas também a térmica. Apesar da obstrução de entorno contribuir para o sombreamento das unidades e atenuar os ganhos solares, observou-se um aumento de 10% na média do desconforto por frio nos

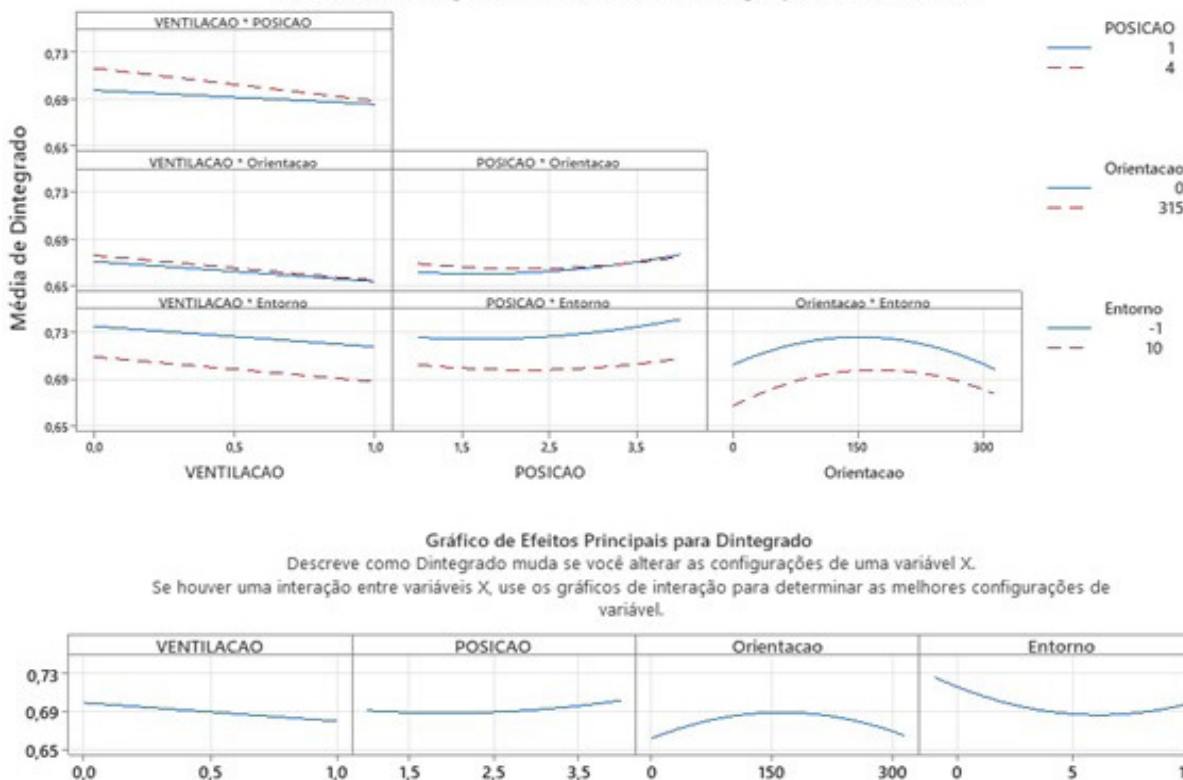
cenários com entorno de 3m de distanciamento. Aliado a isso, o maior desconforto por frio, 53% e a maior média, 41%, também foram ocorreram no entorno de 3m.

Gráfico 8.10 | Mapa de calor do D.I de acordo com a interação dos parâmetros de implantação



Legenda
 POSIÇÃO: 1-Cobertura e quina 2- Cobertura e meio 3- Entre pavimentos e quina 4- Entre pavimentos e miolo

Gráfico 8.11 | Gráficos da Regressão Multivariada - interação dos parâmetros de implantação



Ademais, é importante ressaltar que os estudos apresentados são exploratórios e não tem como objetivo avaliar os efeitos da ventilação urbana no conforto, o desconforto visual e a qualidade do ar interno. Todos estes parâmetros são intrínsecos à morfologia urbana e devem ser levados em consideração na avaliação do impacto do entorno para a

promoção do bem-estar e saúde dos ocupantes em espaços residenciais no decorrer do desenvolvimento do projeto e não apenas o conforto termo luminoso.

Quanto aos parâmetros arquitetônicos (massa, PD, planta, sombreamento e WWR) a interação é mais preponderante entre os parâmetros que afetam a geometria da unidade (pé-direito e planta) com o sombreamento. O pé-direito (PD) foi o parâmetro mais relevante para o desempenho integrado em todas as análises de interação e impacto. Em contrapartida, a massa é o parâmetro que apresentou menor influência não apenas no desempenho integrado, mas também no desempenho térmico.

Gráfico 8.12 | Gráficos da Regressão Multivariada - interação dos parâmetros arquitetônicos

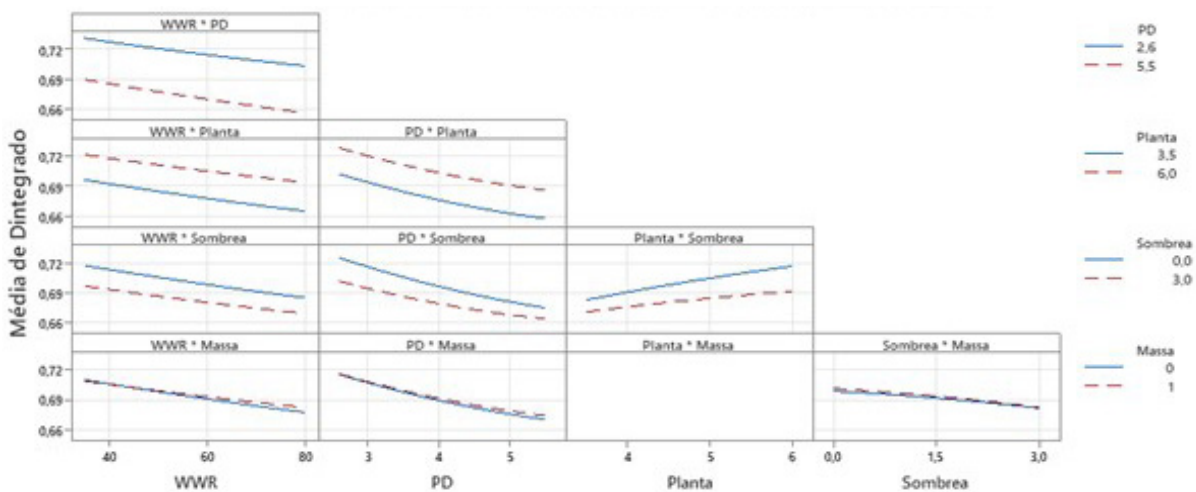
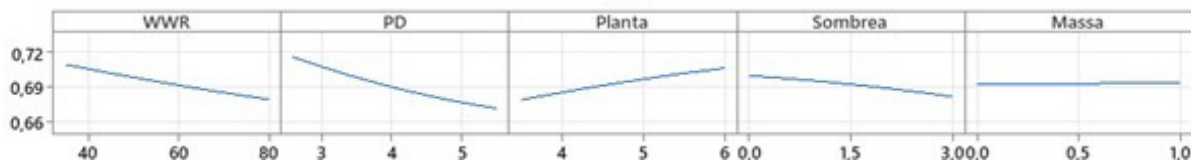


Gráfico de Efeitos Principais para Dintegrado

Descreve como Dintegrado muda se você alterar as configurações de uma variável X.

Se houver uma interação entre variáveis X, use os gráficos de interação para determinar as melhores configurações de variável.



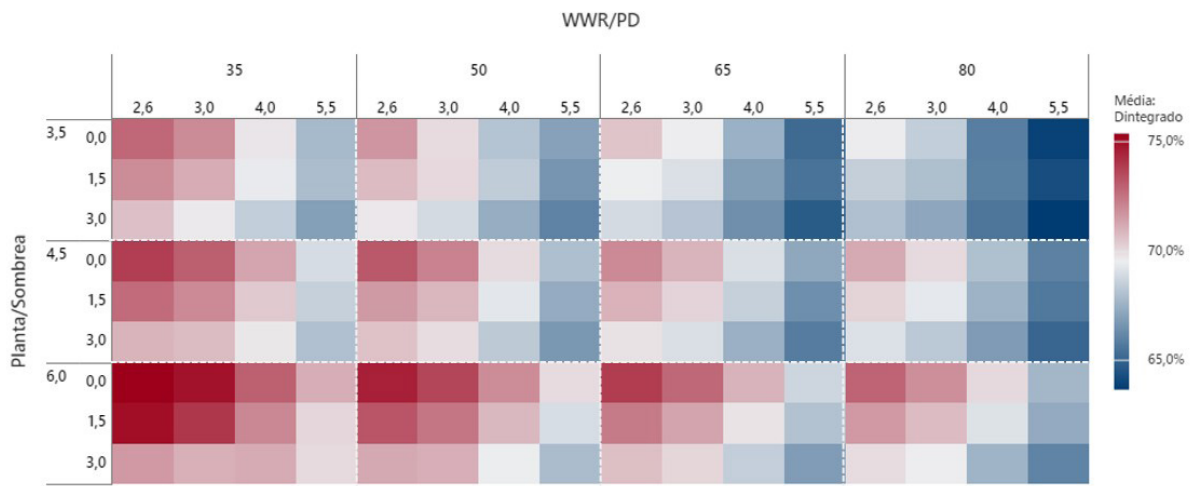
Isto deve-se, provavelmente, à pouca diferença nos valores de inércia térmica e de transmitância (U) da faixa de soluções de massa que compõe o modelo. As composições de massa seguiram os padrões construtivos da construção civil brasileira, para situações com inércia fraca (forro de gesso, laje delgada e bloco de concreto) e inércia média (laje nervurada e parede maciça). Diversos estudos de avaliação dos parâmetros em etapas iniciais de projeto, como Singh *et al* (2022) e Ostergard *et al* (2017), apontam a baixa influência da massa nos estudos de sensibilidade. Recomenda-se a avaliação de cenários com faixas de valores mais largas de inércia e transmitância para uma compreensão mais assertiva dos efeitos da massa no conforto térmico de microapartamentos.

Quanto ao pé-direito, o mapa de calor (gráfico 8.13), que exprime a interação entre os parâmetros arquitetônicos, indica a redução do nível de desempenho integrado conforme o aumento da altura do pé-direito. Há um efeito casado nesse parâmetro, para manter não

afetar o percentual de vidro na fachada (WWR), a área de vidro acompanhava a alteração do pé-direito mantendo o mesmo percentual de WWR. Assim, as variações de pé-direito para uma única solução de WWR mantinha o percentual, mas a área absoluta de vidro era bastante diferente entre as variações do pé-direito, acarretando condições distintas de incidência e exposição solar.

Ademais, observa-se a concentração de níveis de desempenho integrado mais elevado nos conjuntos de soluções com menor pé-direito, menor percentual de área de vidro e planta mais profundas. Tais resultados reforçam a necessidade de atenuar a incidência solar no ambiente interno no contexto climático da cidade de São Paulo para a obtenção de níveis mais elevados de desempenho, mesmo considerando a iluminação natural.

Gráfico 8.13 | Mapa de calor do D.I de acordo com a interação dos parâmetros arquitetônicos



Para concluir a discussão dos resultados considerando as análises da totalidade de cenários apresenta-se os resultado das simulações de Monte Carlo (gráfico 8.14) junto com as análises de sensibilidade (figura 8.1). A simulação de Monte Carlo indicou a tendência de crescimento do percentual de cenários fora da especificação ($D.I > 0.67$) ao caminhar para limites superiores das faixas de variação de todos os parâmetros, com exceção da massa. Em relação aos limites inferiores, o impacto é de redução no percentual fora da especificação, sendo mais significativo alterações nos desvios padrões do pé-direito, do WWR e da planta. As alterações nos desvios padrões dos parâmetros de orientação e massa pouco afetaram os resultados e podem ser desconsiderados para as análises de sensibilidade. Em determinados casos, que serão descritos posteriormente, podem inclusive serem suprimidos do modelo ao não afetarem os resultados (atrás da linha de referência do gráfico de Pareto).

Inicialmente a simulação de Monte Carlo apresentou 14% dos cenários válidos abaixo de 0.67 (LIE) de desempenho integrado e média é de 0.69 de D.I. Após a análise de sensibilidade, considerando a diminuição em 50% dos desvios padrões da planta, do P.D, do WWR e do sombreamento, nenhum dos cenários ficou fora da especificação e a média de desempenho integrado subiu para 0,74, conforme ilustrado nas figuras.

Gráfico 8.14 | Gráfico dos impactos dos parâmetros - Simulação de Monte Carlo

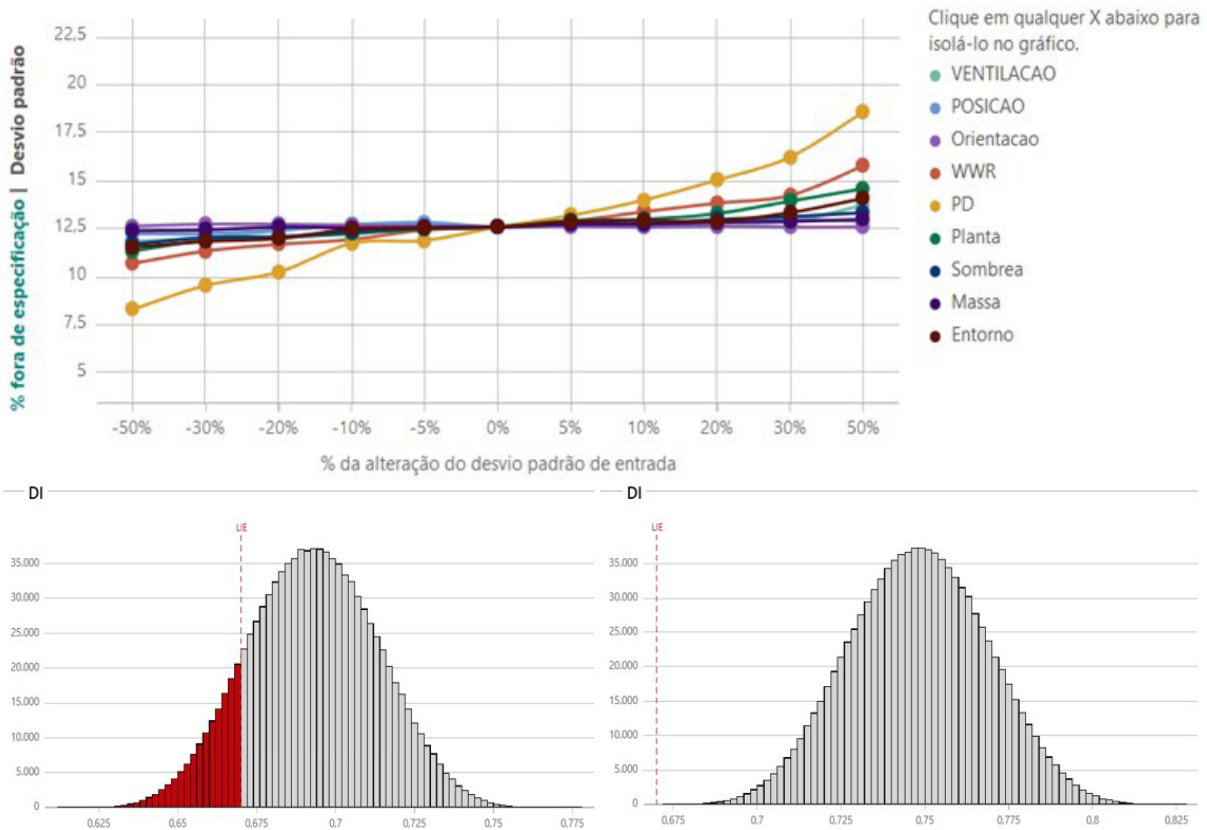


Figura 8.1 | Histogramas resultantes das Simulações de Monte Carlo. A esquerda antes das análises de Sensibilidade. A direita, após análise de Sensibilidade, em que resultou em todos os cenários acima de 0.67 de D.I | Fonte: autoral

8.2.1. DISCUSSÃO AMBIENTAL | POR CASOS

As análises por casos buscam explorar as especificidades que não foram delineadas na discussão da totalidade. Os casos derivam da combinação entre a posição da unidade no edifício e a ventilação, sendo classificados de acordo com a tabela 8.2.

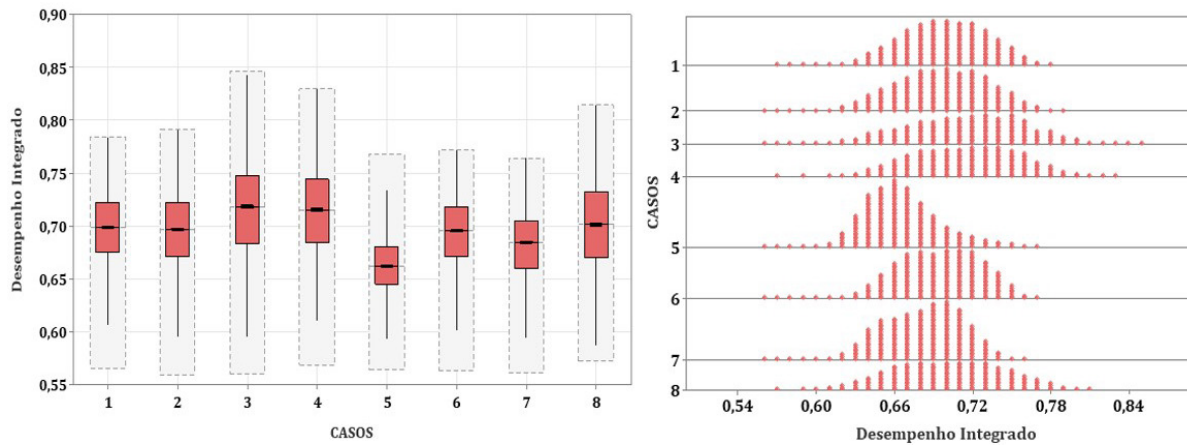
Ao comparar os casos, o que se observa é a tendência de maior desempenho integrado dos cenários entre pavimentos (3, 4, 7 e 8), tanto na ventilação simples, quanto na cruzada. A ventilação ao alterar o comportamento térmico e luminoso das unidades, pois interfere na movimentação de ar e na exposição solar, impacta significativamente o desempenho integrado. Nos cenários posicionados na quina, a inserção da ventilação cruzada representa uma perda de desempenho integrado.

Foram realizadas análises comparativas entre as horas de conforto, de desconforto por calor e por frio, temperatura e UDI para aferir o efeito da exposição solar devido ao posicionamento da unidade e da adição da esquadria na promoção do conforto. Em relação a iluminação natural é observada uma maior influência da inserção da segunda esquadria, do que da posição da unidade. Nos cenários entre pavimentos a insuficiência de luz natural é mais preponderante, principalmente nas unidades de miolo. No caso com as duas esquadrias, essa insuficiência é atenuada e o desconforto luminoso ocorre por excesso de luz.

Tabela 8.2 | Quadro descritivo dos Casos

Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
Cobertura e quina	Cobertura e miolo	Entre pav. e quina	Entre pav. e miolo	Cobertura e quina	Cobertura e miolo	Entre pav. e quina	Entre pav. e miolo
SIMPLES				CRUZADA			

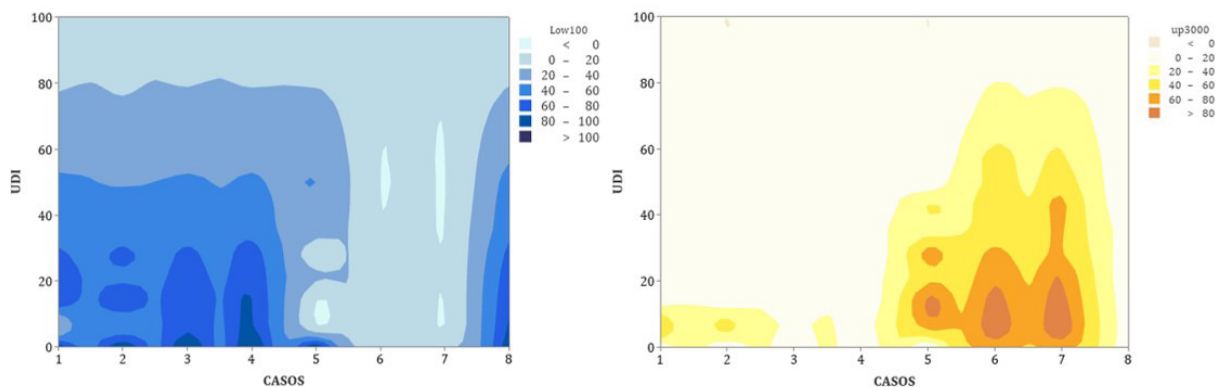
Gráfico 8.15 | Distribuição dos níveis de Desempenho Integrado por casos



Os gráficos de contorno relacionam os percentuais de horas fora da faixa de UDI, por meio da gradação de cores, com o percentual dentro da faixa (100-3000lux), eixo y, organizado em casos. Os gráficos indicaram o expressivo aumento nos casos com cruzada do percentual de horas acima de 3000 lux e, conseqüentemente, a redução do percentual abaixo de 100 lux. Também é demonstrado a influência do posicionamento, em que as unidades de coberturas estão mais suscetíveis ao ofuscamento devido ao excesso de iluminância.

O aumento da faixa acima de 3000 lux pode acarretar, além do ofuscamento, o sobreaquecimento das unidades devido à maior exposição solar. Assim, a avaliação do desempenho térmico nos casos com ventilação cruzada é mais complexa nos microapartamentos, pois junto com o incremento da movimentação de ar proveniente da inserção da segunda abertura, há também o aumento da carga solar nos períodos de calor e perda da capacidade de conservação do calor nos períodos de frio.

Gráfico 8.16 | Gráficos de contorno do desconforto luminoso por casos



O gráfico dos percentuais de horas em conforto e em desconforto (gráfico 8.17) indica uma atenuação do percentual de horas em desconforto por calor nos casos com ventilação cruzada. Esse indicador afirma a eficiência da ventilação cruzada em atenuar o sobreaquecimento por meio da renovação de ar, mesmo com o aumento da carga solar proveniente da adição de área de vidro. Contudo, houve também o crescimento das horas em desconforto por frio, o que impactou o percentual de horas dentro da faixa de conforto.

Como já explicitado nos capítulos anteriores, a métrica de desconforto por frio tende a ser superestimada no modelo adaptativo em climas subtropicais. Portanto, o efeito da ventilação cruzada é mais benéfico à promoção do conforto térmico do que o expressado nos resultados, isto é evidenciado ao analisar as temperaturas operativas máximas e mínimas (gráfico 8.18). Mesmo com o aumento da área de vidro, os cenários com ventilação obtiveram uma redução de temperatura máxima significativa nos cenários mais extremos, chegando a 4°C. Na média, as temperaturas máximas tiveram uma redução de 0.5°C.

Gráfico 8.17 | Distribuição das horas em conforto e em desconforto

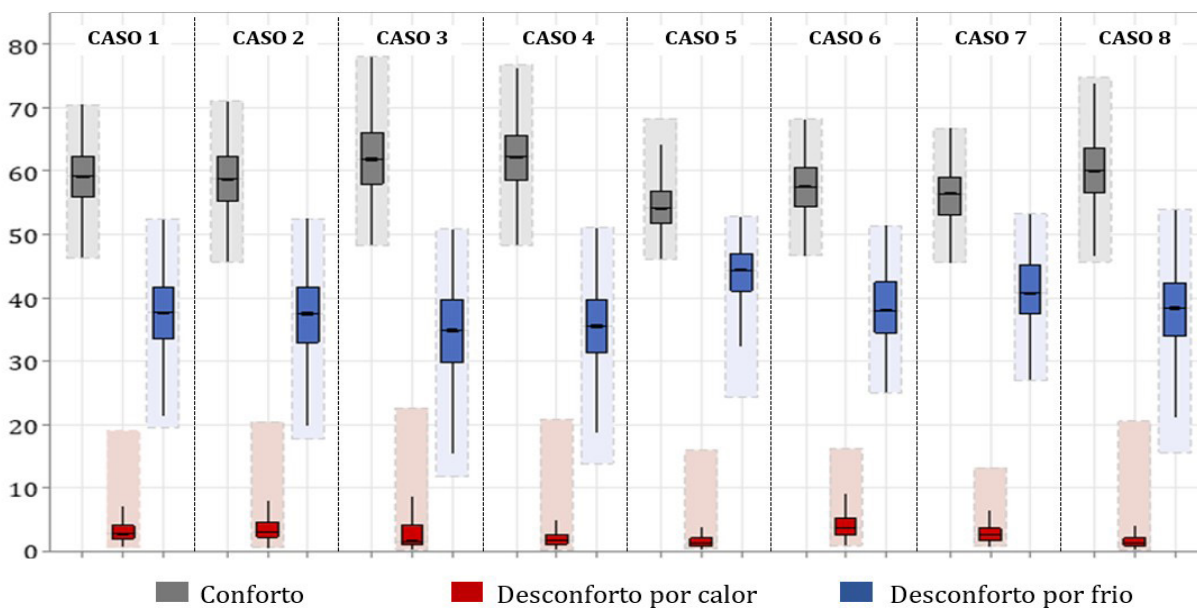
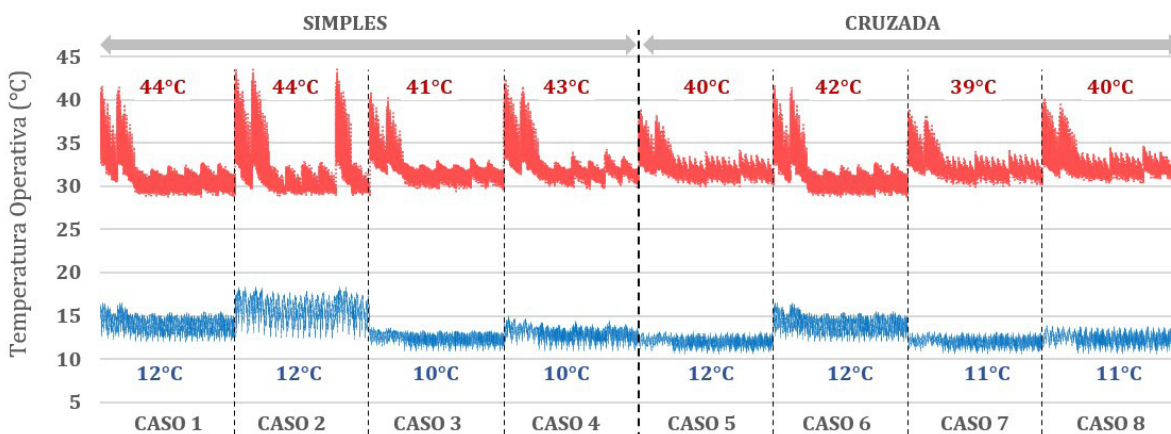
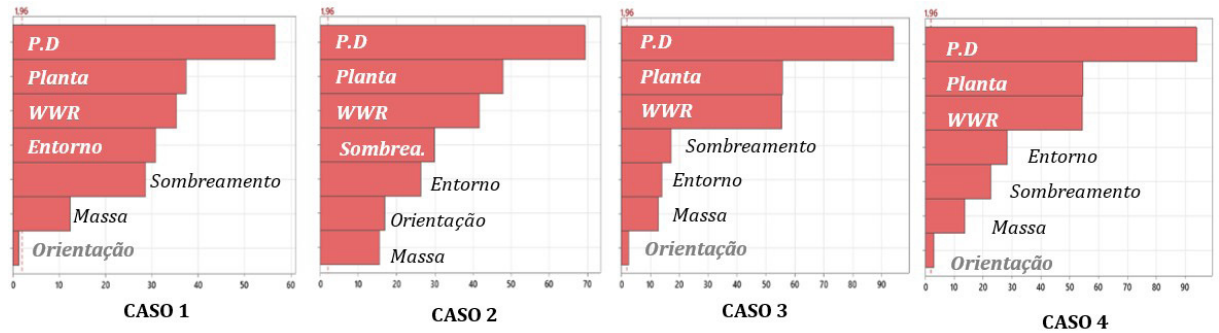


Gráfico 8.18 | Gráfico da série das Temperaturas Operativas Máximas e Mínimas

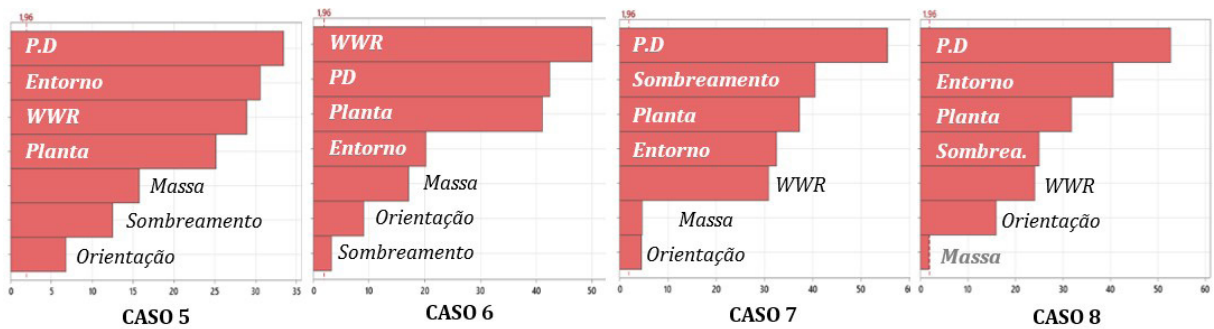
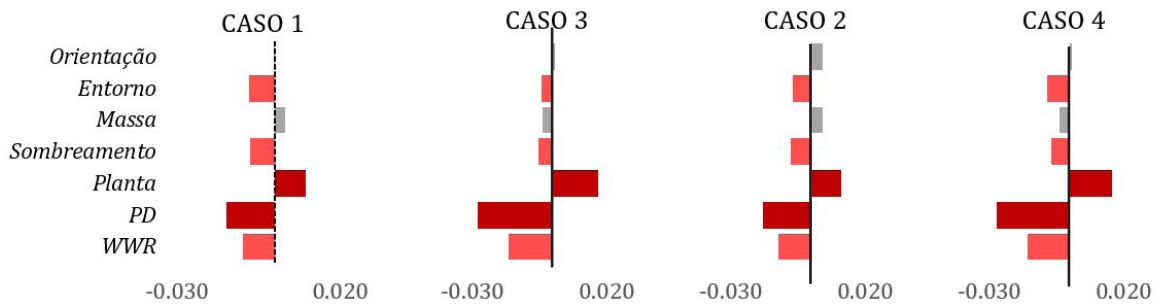


Por fim, avaliou-se a relevância dos parâmetros para cada caso evidenciando o efeito das especificidades de cada caso, por meio dos gráficos (8.19) por casos de Pareto e de SRRC (rank dos parâmetros padronizados das regressões). Os resultados demonstraram que pouco se altera na ordem de relevância nos casos com ventilação simples. Entretanto, nos casos com ventilação cruzada, o posicionamento da unidade no edifício afeta significativamente o nível de relevância dos parâmetros.

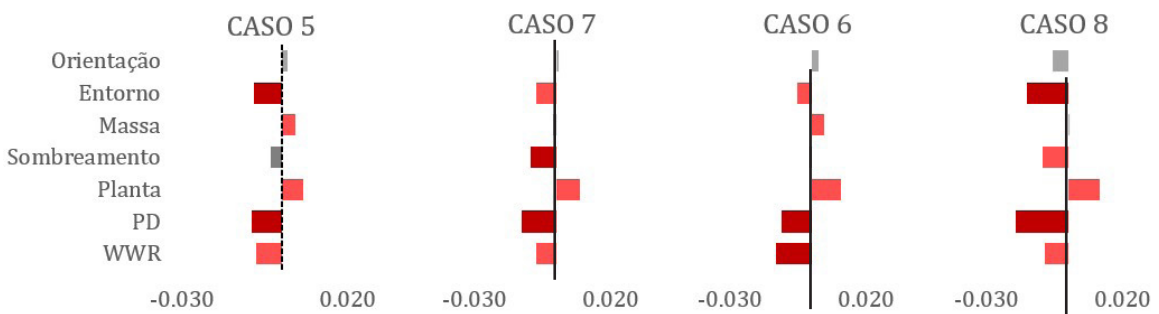
Gráfico 8.19 | Gráfico da Importância (Pareto) e Magnitude dos parâmetros (SRRC)



SRRC (Rank do parâmetros Padronizados)



SRRC (Rank do parâmetros Padronizados)

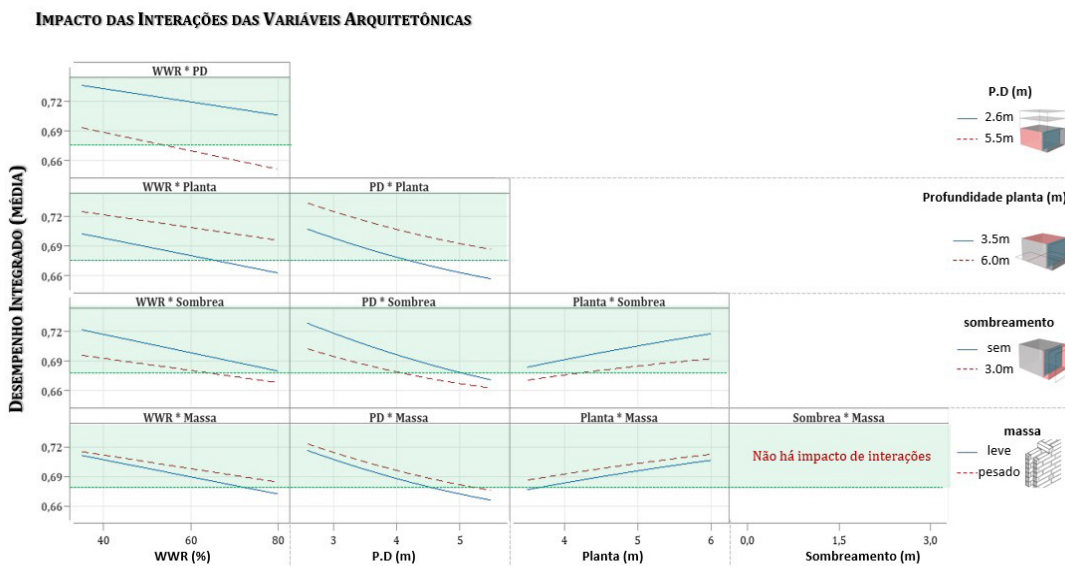


Ainda no conjunto de casos da ventilação simples, nas unidades de quina (casos 1 e 3) a massa se torna relevante e a orientação não apresenta impacto nos resultados, em especial nas unidades de quina da cobertura (caso 1). Em todas as situações o pé-direito (P.D), profundidade de planta (Planta) e percentual de vidro na fachada (WWR) foram os parâmetros que mais influenciaram os resultados, mantendo comportamento semelhante ao verificado quando considerado a totalidade dos cenários.

Nos cenários com ventilação cruzada, cada caso apresenta uma ordem única indicando um grande efeito dos parâmetros de posição nos resultados. O grau de impacto entre os cinco primeiros parâmetros é bastante similar, o oposto dos casos de ventilação simples, em que o pé-direito é mais relevante do que os demais. Nos cenários de entre pavimentos o percentual de vidro da fachada perde grau de relevância, passando a ser o quinto mais impactante. Nas unidades de cobertura a massa passa a ter significância, impulsionada provavelmente pelo aumento de fachadas expostas ao sol e ao vento e pelo aumento de área de vidro.

Em relação às interações entre os parâmetros, este tópico será discutido considerando os principais efeitos observados, os gráficos detalhados para cada caso podem ser consultados nas matrizes contidas em apêndice deste trabalho. Nos casos com ventilação simples (1-4) a interação entre os parâmetros arquitetônico é bastante elevada, com exceção da massa nos casos 1 e 2. Nos casos 1 e 2, localizados na cobertura, observa-se que os parâmetros que impactam diretamente a incidência solar são mais predominante e demonstraram ter elevada interação entre si. A interação entre os parâmetros que afetam a área de vidro e o sombreamento é inversamente proporcional, como demonstrado no gráfico 8.19. Ao analisar isoladamente o desempenho integrado, percebe-se a tendência de piora com o aumento da área de vidro, seja em função da mudança do WWR ou do pé-direito, e melhora com a diminuição da profundidade da planta e do sombreamento.

Gráfico 8.20 | Gráfico da Interação dos Parâmetros Arquitetônicos - Caso 1



Contudo, nestes casos as combinações de grandes áreas de vidro com sombreamento ou de pouca área de vidro sem sombreamento tendem a desempenhos integrados semelhantes, afirmando a interação e os efeitos complementares dessas estratégias. Tal dinâmica não é verificada nos casos entre pavimentos com ventilação simples (3 e 4). Nestes o aumento da área de vidro, mesmo com proteção solar tende a resultados piores do que com pouca área de vidro. A massa também passa a ter maior interação, em especial no caso 3 (entre pavimentos e quina), mas baixo impacto nos resultados.

Nos casos de ventilação cruzada, o incremento da área de vidro minimizou a interação da massa, sendo que apenas o caso 6 apresenta gráficos de interação com a massa. Observa-se também uma menor interação entre os parâmetros arquitetônicos, sendo mais expressivo entre o sombreamento e a planta, o pé-direito e o WWR. Entretanto, a tendência dos impactos da interações continua semelhante ao dos casos com ventilação simples, com uma maior dificuldade de alcançar níveis superiores a 0.75 de desempenho integrado.

8.3. DISCUSSÃO PROJETUAL

As avaliações ambientais são bastante complexas e dinâmicas o que impossibilita a formulação de respostas ou caminhos universais como orientações simplificadas a serem aplicadas ao projeto. Em contrapartida, a necessidade de informações mais detalhadas para estudos ambientais dificulta a aplicação das avaliações no início do processo de projeto. Para contribuir com informações ao início do processo de projeto, buscou-se desenvolver uma cartilha orientativa a partir do tratamento dos dados resultantes do vasto universo de soluções simuladas. Apresenta-se a cartilha do caso 1 desenvolvida para orientar a tomada de decisão no final desse item (8.3). No apêndice desta pesquisa é possível consultar a cartilha para cada caso.

Na matriz de decisão do grau de relevância, com base no percentual de ocorrência, permite consultar a relevância de cada solução diante da combinação dos parâmetros de implantação (entorno e orientação). Quanto menor a gradação de cores entre as soluções para o mesmo parâmetro arquitetônico, menor a relevância entre elas. Quanto maior, mais preponderante é uma solução em relação as demais, podendo ser a única ou inexistente para determinada combinação de implantação.

A análise em conjunto com a matriz de interações permite averiguar a relevância, o sentido do impacto no desempenho integrado, se é negativo ou positivo, e a interação com os demais parâmetros melhorar o desempenho. Assim, permite-se explorar de forma orientada o universo de soluções e elencar o conjunto de soluções mais adequado as premissas de projeto

De forma geral, o que se verificou, por meio das análises das matrizes, foi a

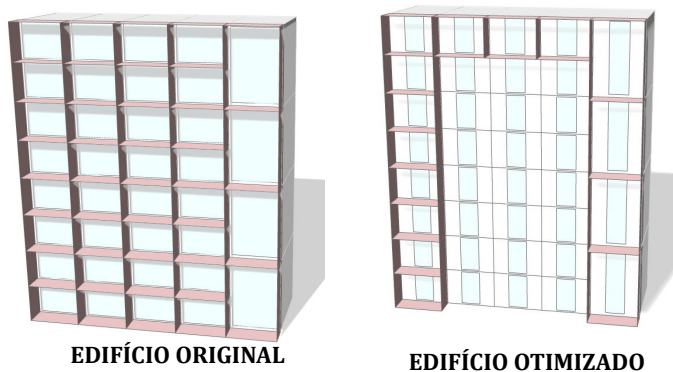
homogeneidade das soluções na condição sem entorno e maior restrições de soluções quando o entorno está à 3m de distância. Ao observar por casos, os que contemplam a ventilação cruzada demonstram uma intensificação do grau de relevância das soluções, com maior ocorrência de soluções únicas ou inexistentes, principalmente em relação aos parâmetros de sombreamento e pé-direito.

Ainda, os casos entre pavimentos (3,4, 7 e 8) indicam a pouca relevância de soluções com elevado sombreamento e alto percentual de vidro na fachada (WWR), alertando para baixa eficácia dessas soluções de projeto para os microapartamentos. Por fim, tanto a matriz de relevância, quanto a tabela que numera os cenários com melhor desempenho integrado, enfatizam a necessidade de reduzir a área envidraçada para climas subtropicais. No contexto climático atual de São Paulo, o aumento absoluto da área de vidro em ambientes compactos demonstrou-se ser extremamente crítico no desempenho termo-luminoso. Assim, é imprescindível que os projetistas tenham consciência do impacto de ambientes com grandes panos de vidro, sem tratamento adequado no conforto e no meio ambiente.

Para exemplificar o uso das matrizes, realizou-se um estudo comparativo com o edifício dos estudos de casos utilizado para validação das simulações. A seguir compara-se o nível de desempenho do edifício considerando as soluções existentes e o edifício otimizado, a partir da aplicação da matriz de decisão.

O edifício está orientado a sudoeste e é constituído de unidades duplex na cobertura, na quina a direita, de loft (unidades com pé-direito duplo) com ventilação cruzada e no miolo e na quina a esquerda de microapartamentos. Buscou-se aplicar as melhores soluções para tal configuração, utilizando as matrizes como orientação para tomada de decisão.

Observou-se uma melhoria no desempenho integrado de 6% na média e no conforto térmico de 8% no edifício otimizado.



A maior diferença constatada foi na posição 3 na tipologia de microapartamentos, em que houve uma redução de quase 10% no desempenho integrado. Em relação ao desempenho luminoso não houve alterações relevantes, os resultados variaram entre 99% e 91%, sendo o mais impactante a redução do UDI em 9% na posição 3.

Figura 8.2 | Edifício original vs Otimizado | Fonte: autoral

Ao final da discussão dos resultados, extrapolou-se as avaliações para cenários futuros considerando as melhores combinações de soluções por caso e as piores em relação ao desconforto por calor.

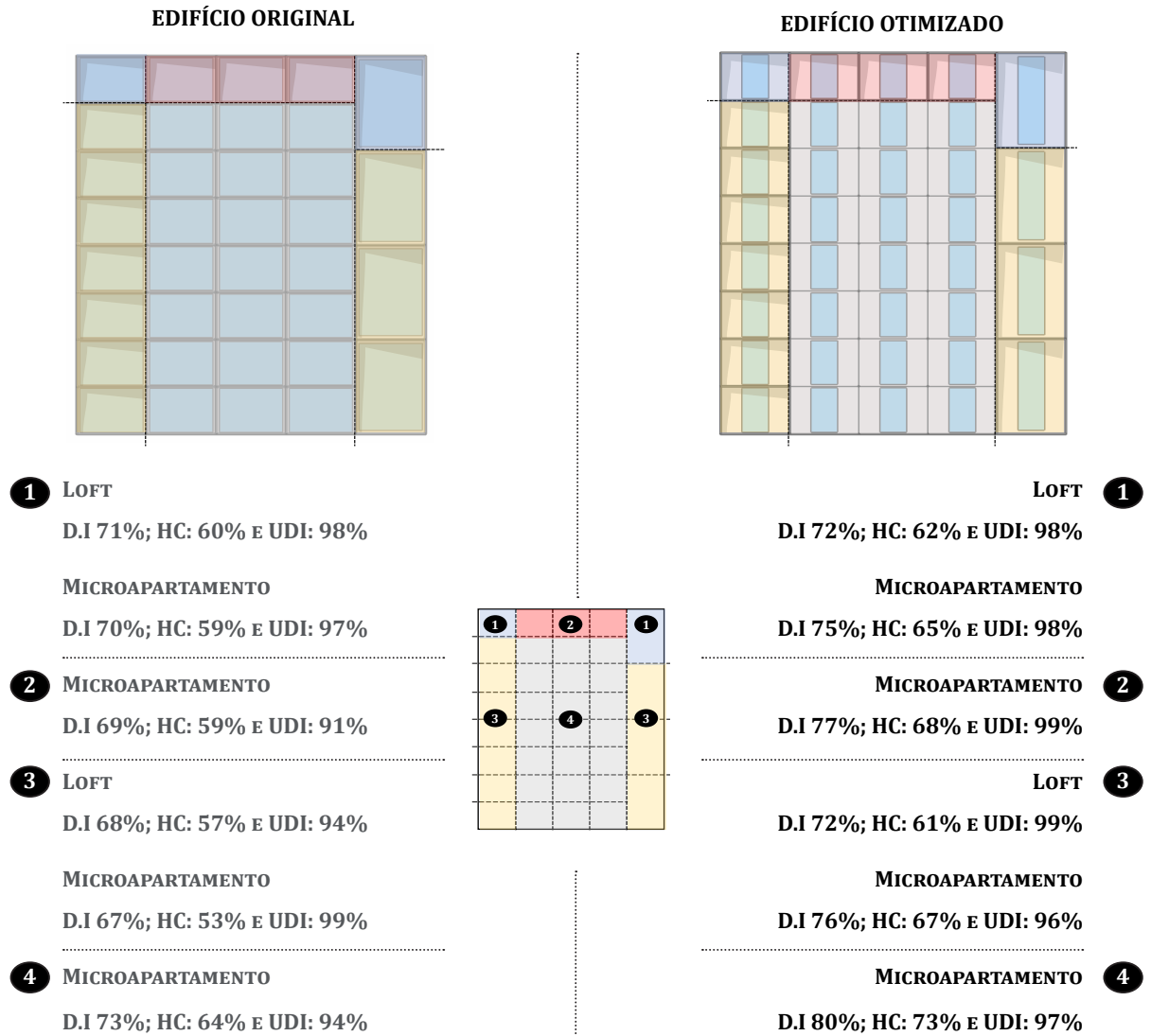


Figura 8.3 | Diagrama comparativo entre edifício original e otimizado | Fonte: autoral

INTRODUÇÃO | PARÂMETROS DO UNIVERSO DE SOLUÇÕES AVALIADAS

CONDIÇÕES DE OCUPAÇÃO

UNIDADE: MICROAPARTAMENTO (20M²)

2 PESSOAS

ATIVIDADE: 108W/PER

EQUIPAMENTOS: 120W

ILUMINAÇÃO: 5W/M²

30% ABERTA*

CENÁRIOS AVALIADOS (73.728 combinações entre os parâmetros)

8 CASOS

ENTORNO: 3M, 5M, 10M, SEM

ORIENTAÇÃO: N, NO, O, SO, S, SE, L, NE

COBERTURA: MIOLO, QUINA

ENTRE PAVIMENTOS: MIOLO, QUINA

POSICÃO DA UNIDADE NO EDIFÍCIO: CRUZADA, SIMPLES

VENTILAÇÃO: % ÁREA DE VIDRO (WWR) 35%, 50%, 65%, 80%

ARQUITETÔNICO: PÉ-DIREITO 2.6M, 3.0M, 4.0M, 5.5M; PROFUNDIDADE DE PLANTA 3.5M, 4.0M, 6.0M; SOMBREAMENTO SEM, 1.5M, 3.0M; MASSA LEVE¹, PESADO²

* Abertura tipo porta e somente operável nos períodos ocupados

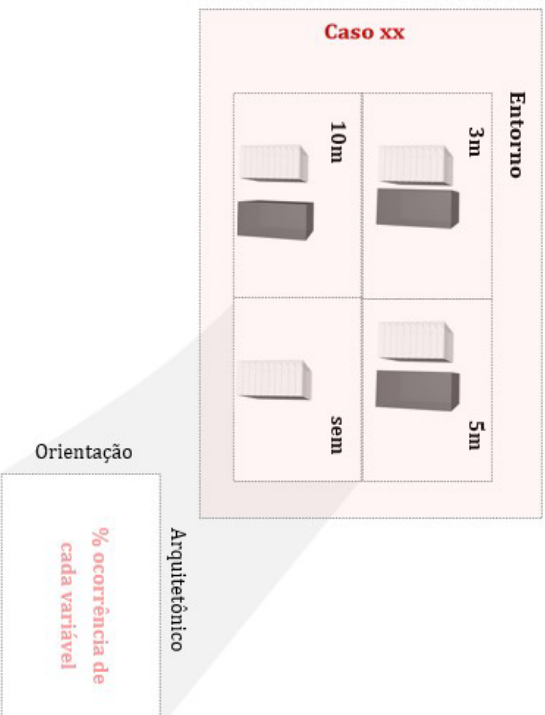
PESADO² : ALVENARIA MACIÇA DE 10CM E LAJE NERVURADA DE 18CM

LEVE¹ : ALVENARIAS EM BLOCO CONCRETO E LAJE MACIÇA DE 12CM COM FORRO DE GESSO.

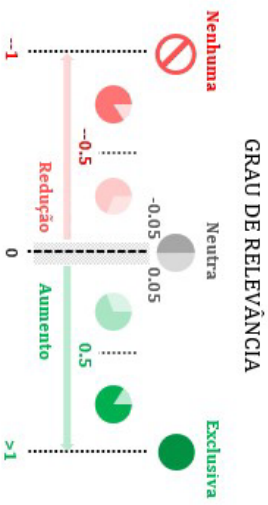
APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

MÉTODO DE AVALIAÇÃO

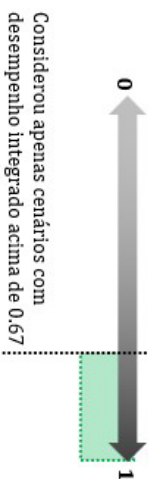
POR CASOS (8 CASOS: POSIÇÃO + VENTILAÇÃO)



LEGENDA DA MATRIZ DE RELEVÂNCIA



DESEMPENHO INTEGRADO > 0.67



TÉRMICA + LUZ NATURAL = DESEMPENHO INTEGRADO

Horas de Conforto (HC) + Horas de UDI

$$\text{Desempenho Integrado} = \frac{(\text{HC} * 0.7 + \text{UDI} * 0.3)}{100}$$

TÉRMICA | HC

ILUMINAÇÃO | UDI

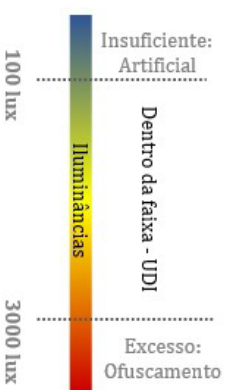
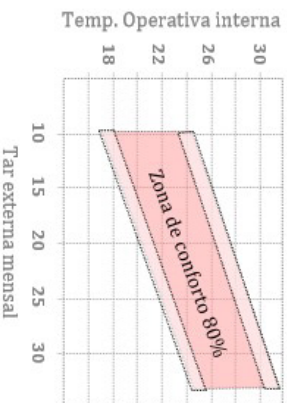
Índice Modelo Adaptativo ASHRAE-55

Faixa Zona de conforto de 80% de aceitabilidade

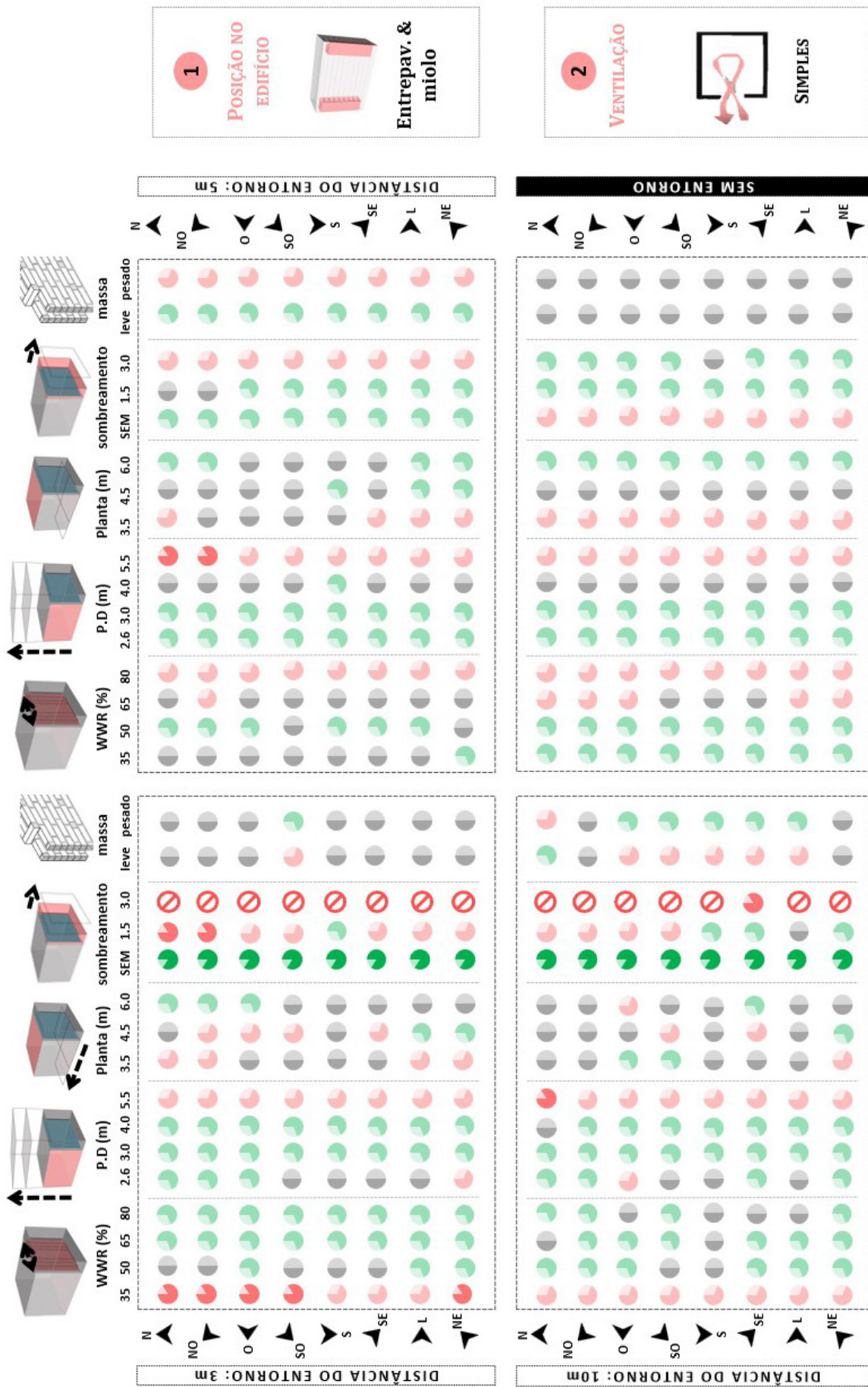
Resultado Percentual de horas anuais dentro da faixa.

Iluminações Úteis da Luz diurna (UDI) 100lux - 3000lux

Percentual de horas anuais dentro da faixa.



Grau de relevância de cada solução dentro os cenários que apresentaram desempenho integrado acima de 0.67



Descreve como o desempenho Integrado muda quando há alterações de duas variáveis.

IMPACTO DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS

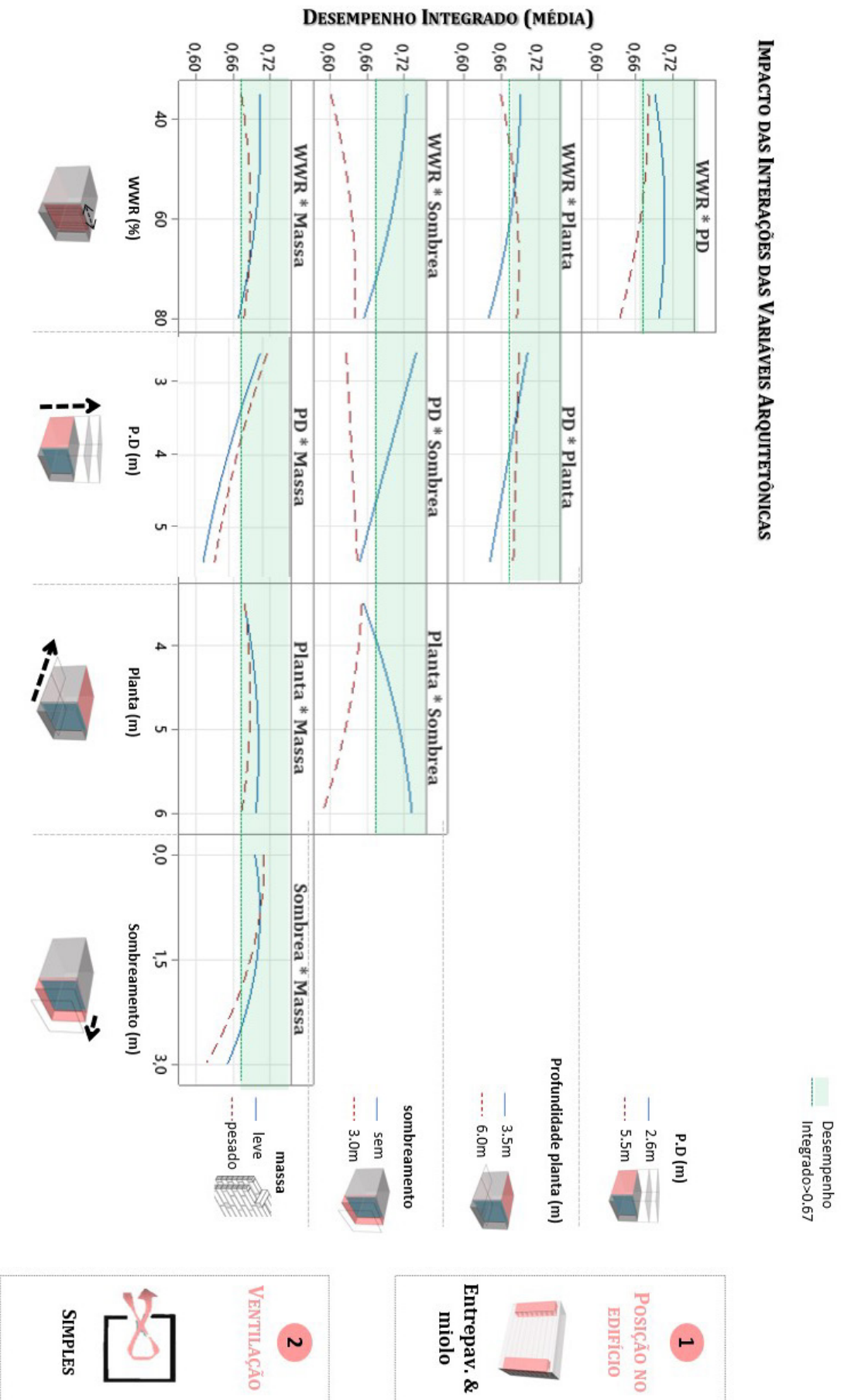




Figura 8.4 | Cartilha orientativa das Estratégias Passivas para conforto termo luminoso - Caso 1 | Fonte: autoral

8.4. CENÁRIOS FUTUROS

Em 2015, a temperatura média global do planeta foi de 0.75°C acima da temperatura média do período entre 1961-1990 e a mais alta desde 1950 (Met-office, 2016). As últimas três décadas têm sido as mais quentes desde 1950 e se as emissões de gases de efeito estufa continuarem no mesmo patamar atual, a temperatura de ar média do período entre 2020-2081 poderá ser 4.8°C mais elevada que entre 1986-2005 (IPCC, 2014¹). Ainda, o IPCC alerta que se continuar a aumentar na mesma taxa, o aquecimento global provavelmente atingirá 1.5°C entre 2030 e 2052.

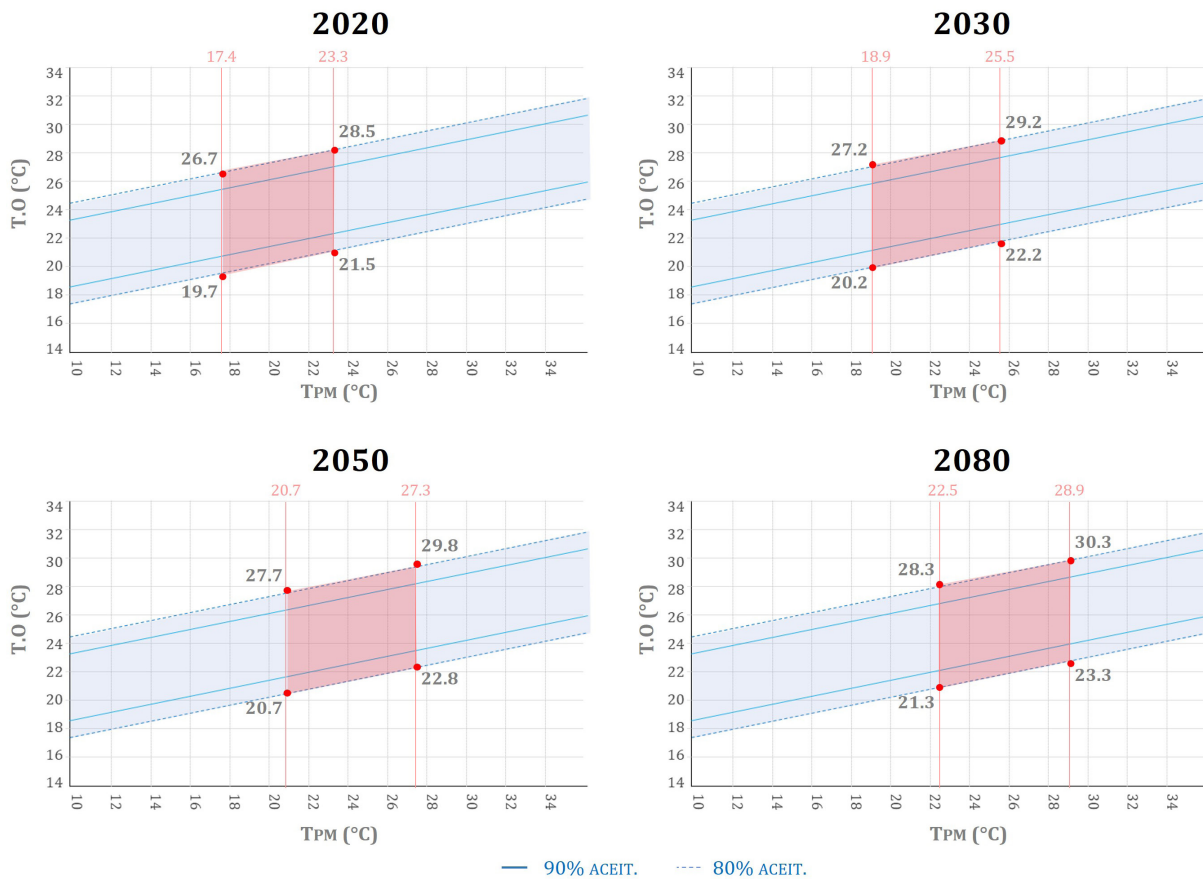
Apesar de serem projeções, possibilitam mensurar a magnitude dos possíveis impactos ao ser humano decorrente do aquecimento global, o que é fundamental para a elaboração de políticas públicas e edifícios mais resilientes do ponto de vista climático. A crescente urbanização tende a tornar as cidades mais suscetíveis às externalidades ambientais causadas pelas mudanças climáticas, uma vez que representam mais de 70% das emissões globais de CO₂ e concentram a maior parte da população mundial (GURNEY et al., 2015). O cotidiano da população urbana está intrinsecamente relacionado aos aspectos ambientais, em especial às especificidades climáticas de cada região (GOBO et al., 2022).

Assim, realizaram-se avaliações futuras considerando o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 do IPCC – AR5 para 2030, 2050 e 2080, o mais drástico em relação à tendência de aquecimento global. As análises comparativas consideraram os cenários simulados que obtiveram os melhores níveis de desempenhos integrados e os piores percentuais de hora em desconforto por calor para cada caso. As avaliações futuras concentraram-se na análise das temperaturas operativas máximas e do percentual de desconforto por calor, visto que são os dois indicadores que melhor representam os efeitos do aquecimento global.

Primeiramente, apresenta-se uma análise climática dos cenários futuros e presente em relação ao modelo adaptativo. O índice de conforto do modelo adaptativo ASHRAE-55 é baseado nas temperaturas operativas (TO) internas e externas predominante média (T_{pm}), conforme há mudanças no perfil climático altera-se também as temperaturas operativas que se encontram dentro das faixas de conforto, conforme ilustrado no gráfico 8.20. Por tanto, observa-se que em cenários futuros, as temperaturas operativas dentro das faixas se deslocam para direita do gráfico, tendendo a aceitabilidade de temperaturas internas mais elevadas do que no cenário presente. No clima presente de São Paulo, a faixa de temperaturas operativas máximas está entre 26.7°C e 28.5°C, em 2080 ela passa a ser entre 28.3°C e 30.3°C, conforme demonstrado no gráfico 8.21.

1 Esta pesquisa está utilizando o AR5 do IPCC (2014) para análise dos cenários futuros, pois os arquivos climáticos aplicados foram construído com base nos cenários futuros do AR5. entretanto, ressalta-se que o relatório mais atualizado é o AR6, publicado em 2022.

Gráfico 8.21 | Gráfico do Modelo Adaptativo (ASHRAE-55) - Cenários Presentes e Futuros



Essa primeira análise é importante para compreender que o índice de conforto térmico aplicado nesta pesquisa adapta-se às mudanças climáticas e, portanto, a tolerância do usuário também se adequa à elevação das temperaturas. Contudo, mesmo considerando esse poder de adaptação, o que se observa é o aumento do percentual em desconforto por calor nos cenários futuros. Por isso, além das análises de conforto futuro e presente, realizaram-se também avaliações das temperaturas operativas internas e do grau-hora para resfriamento e aquecimento (gráficos 8.22).

Os percentuais de horas em desconforto por calor indicaram um comprometimento significativo do conforto do usuário nos cenários futuros (tabela 8.3). Os gráficos da alteração do conforto térmico representam o impacto das mudanças climáticas no conforto de forma global, considerando horas de conforto, desconforto por frio e desconforto por calor (gráficos 8.22).

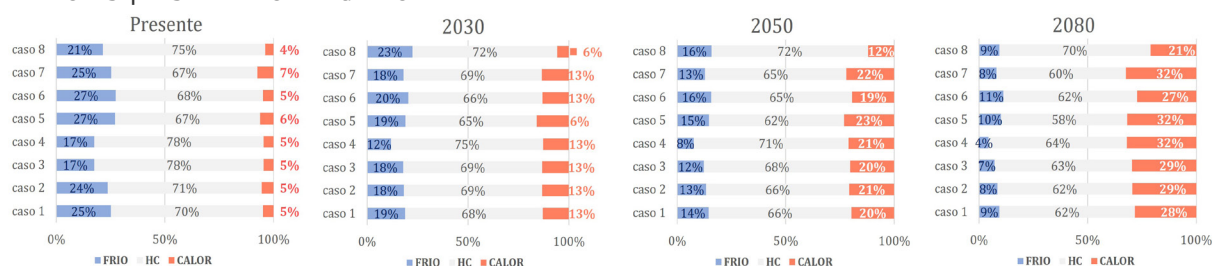
Os resultados das soluções que abrangem os melhores níveis de desempenho integrado apresentaram aumento médio de desconforto por calor de 25%, passando de 5% para aproximadamente 30%. Nos cenários com soluções que propiciam o sobreaquecimento dos microapartamentos, este período chegou a 40%. Corroborando com os resultados encontrados nessa pesquisa, os trabalhos de Triana *et al* (2016) e de Alves (2014) acerca dos impactos das mudanças climáticas no conforto térmico das residências na cidade de São

Tabela 8.3 | Percentual de horas em Desconforto por Calor (anos - Futuro)

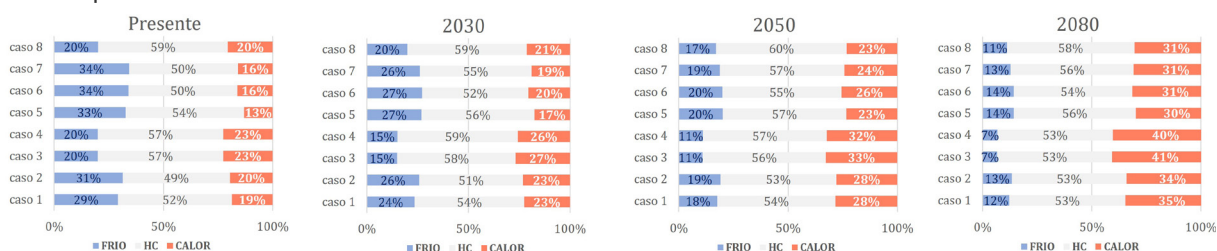
		Melhores Situações de D.I					Piores Situações de Desconforto por Calor				
		Atual	2030	2050	2080	Aumento % em desconforto	atual	2030	2050	2080	Aumento % em desconforto
Cobertura e Quina	simples	5%	13%	20%	28%	24%	19%	23%	28%	35%	16%
	cruzada	6%	16%	23%	32%	26%	13%	17%	23%	30%	17%
Cobertura e Miolo	simples	5%	13%	21%	29%	25%	23%	26%	32%	40%	18%
	cruzada	5%	13%	19%	27%	22%	16%	20%	26%	31%	15%
Entre Pav. e Quina	simples	5%	13%	21%	32%	27%	23%	27%	33%	41%	18%
	cruzada	7%	13%	22%	32%	25%	16%	19%	24%	31%	15%
Entre Pav. e Miolo	simples	5%	13%	20%	29%	25%	23%	26%	32%	40%	18%
	cruzada	4%	6%	12%	21%	17%	20%	21%	23%	31%	10%

Gráfico 8.22 | Gráfico dos percentuais de conforto e desconforto - Cenários Presentes e Futuros

MELHORES | DESEMPENHO INTEGRADO



PIORES | DESCONFORTO POR CALOR



Paulo também demonstraram um aumento expressivo no percentual de horas ocupadas em desconforto por calor e uma redução no desconforto por frio. Triana *et al* (2016) afirmam que o desconforto por calor passa de 9,4% no presente para 21,6% em 2050, e por frio de 16,5% no cenário presente para 1,5% em 2050.

Em relação à ventilação, observou-se a contribuição da ventilação cruzada na promoção do conforto térmico ao reduzir os períodos de desconforto por calor. Apesar do aumento dos ganhos solares devido a inserção de mais uma abertura envidraçada, o benefício da ventilação cruzada na redução da temperatura interna é significativo. Em todos os cenários futuros e presente, o percentual de desconforto por calor é menor nos casos com ventilação cruzada (casos de 5-8), em relação aos de ventilação simples (1-4), conforme representado nos gráficos 8.22.

Quanto às análises de temperatura operativa máxima, estas demonstraram a suscetibilidade dos ambientes interno em relação ao aquecimento devido à elevação das temperaturas externas. Nas situações com os melhores desempenhos integrados a elevação da temperatura foi atenuada. Na média observou-se um aumento da temperatura interna

de 6°C quando comparado o clima presente e o projetado em 2080. No melhor dos casos, o 8 (entre pavimentos- miolo e ventilação cruzada), o acréscimo foi de 4.8°C em 2080 e inferior a 1°C em 2030, afirmando a resiliência da solução arquitetônica. Entretanto, o pior caso dentre as melhores situações de desempenho integrado foi a cobertura de quina com ventilação cruzada (caso 5), em que o aumento da temperatura interna foi de 7.4°C, chegando a 40.3°C em 2080, o que pode acarretar prejuízos significativos a saúde e à eficiência energética.

Tabela 8.4 | Temperaturas Operativas Máximas por período (anos - Futuro)

		Melhores Situações de Desempenhos Integrados					Piores Situações de Desconforto por Calor				
		Atual	2030	2050	2080	Aumento	Atual	2030	2050	2080	Aumento
Cobertura e Quina	simples	32.0	34.4	36.1	38.5	6.5°C	39.8	44.1	45.7	48.6	8.8°C
	cruzada	32.9	36.0	37.9	40.3	7.4°C	34.6	38.4	40.6	43.3	8.7°C
Cobertura e Miolo	simples	32.1	34.7	36.4	38.7	6.6°C	40.9	45.5	46.8	49.7	8.8°C
	cruzada	32.9	34.8	36.6	38.9	6.0°C	38.7	42.8	45.0	47.2	8.5°C
Entre Pav. e Quina	simples	32.1	34.6	36.3	38.3	6.2°C	41.6	46.2	47.5	50.5	8.9°C
	cruzada	32.4	34.7	37.0	38.5	6.1°C	38.6	41.2	43.7	45.7	7.1°C
Entre Pav. e Miolo	simples	32.1	35.3	37.0	39.1	7.0°C	41.6	44.2	45.9	43.5	1.9°C
	cruzada	31.9	32.3	34.2	36.7	4.8°C	36.1	38.4	40.7	48.9	12.8°C

Em contrapartida, os resultados do conjunto de soluções com os piores percentuais de desconforto por calor indicaram a baixa capacidade de alguns cenários em se adaptarem às mudanças climáticas. Neste, além do comprometimento do conforto, as condições térmicas encontradas representam risco a saúde e a vida do usuário ao promover stress térmico. A média da temperatura operativa interna é de 47°C, podendo atingir 50°C, níveis de temperatura que tornam imprescindível o uso de condicionamento ativo para resfriar o ambiente. Não obstante, o pequeno volume de ar desses espaços compactos intensifica a influência das temperaturas superficiais no desempenho térmico e em contexto de temperaturas extremas de calor propiciam o rápido aquecimento do ambiente interno.

Ainda, temperaturas tão elevadas também afetam na capacidade de resfriamento dos equipamentos, uma vez que o delta de temperatura e a carga térmica são muitos elevados. Este quadro impacta, não somente a eficiência energética do sistema, mas também o tempo necessário para atingir a temperatura de conforto esperada. Outro fator que interfere na capacidade de condicionamento é a configuração do ambiente interno, em que a disposição dos mobiliários pode se tornar obstáculo a mistura homogênea dos fluidos (ar) como verificado nas medições do estudo de caso (b). Assim, se o sistema de condicionamento não for adequadamente dimensionado em ambientes compactos, a elevação das temperaturas externas afetará a eficiência energética e a capacidade de refrigeração impactando o conforto térmico.

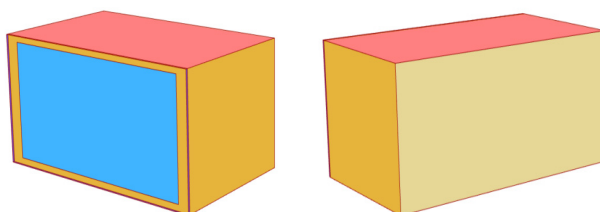
Por fim, realizou-se análises comparativas entre o melhor caso (caso 8) e o pior caso (caso 2 – temperatura operativa de 50.5°C) para cenários futuros e presentes, avaliando

o nível de conforto térmico, temperatura e graus-horas para resfriamento e aquecimento. Apresenta-se o gráfico da série anual das temperaturas operativas internas e da faixa de conforto do modelo adaptativo para 80% de aceitabilidade para cada cenário climático desses dois casos (gráfico 8.23). Este gráfico descreve o comportamento térmico dos ambientes avaliados em que no caso com o melhor desempenho, percebe-se uma menor tendência de sobreaquecimento ao longo dos cenários futuros do que no caso com o pior desempenho. No melhor caso o percentual de horas em conforto passa de 75% no cenário presente, para 69% em 2080, já o pior, passa para 52% de conforto em 2080.

A ocorrência de temperaturas operativas elevadas reforça tal tendência, em 2080 no pior caso tem-se uma estimativa de 38% do ano com temperaturas operativas internas acima de 30°C e no melhor caso, apenas de 20%. Outro indicador importante de avaliação dos impactos das mudanças climáticas é o total de graus-hora para resfriamento ou aquecimento, que quantifica o quão distante as temperaturas horas estão da zona de conforto (gráfico 8.24). Os graus-horas de resfriamento em todos os casos apresentam uma crescente ao longo dos cenários futuros. Entretanto, o total de graus-hora de resfriamento no pior caso é cinco vezes maior do que no melhor caso em 2080. Estes valores reforçam a dependência do pior caso em condicionamento ativo, reforçam a ineficiência das estratégias passivas que compõe o pior caso em promover o conforto térmico do usuário.

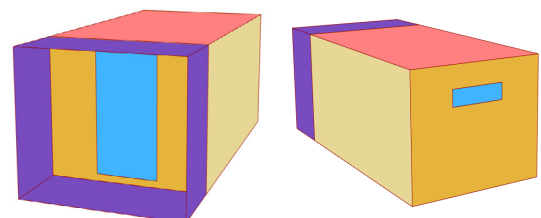
As elevações das temperaturas operativas internas, não apenas fomentará o uso mais frequente de condicionamento ativo, como também de maior consumo energético devido ao aumento do delta de temperatura. Assim, reforça-se a necessidade de se projetar considerando os contextos climáticos presentes, como também os futuros. Não obstante, reavaliar as estratégias para que se encontre um equilíbrio entre soluções que melhor atendam o presente, sem comprometer o futuro. Os resultados indicaram mudanças significativas nas variáveis de térmica que afetaram tanto o conforto do usuário como a eficiência energética.

PIOR CASO (2) | DESCONFORTO POR CALOR



SOLUÇÕES: COBERTURA - QUINA | SIMPLES
orientação NO; 80% wwr; 4m profund. de planta; 2.6m p.d;
sem sombreamento; massa leve; sem entorno

MELHOR CASO (8) | DESEMPENHO INTEGRADO

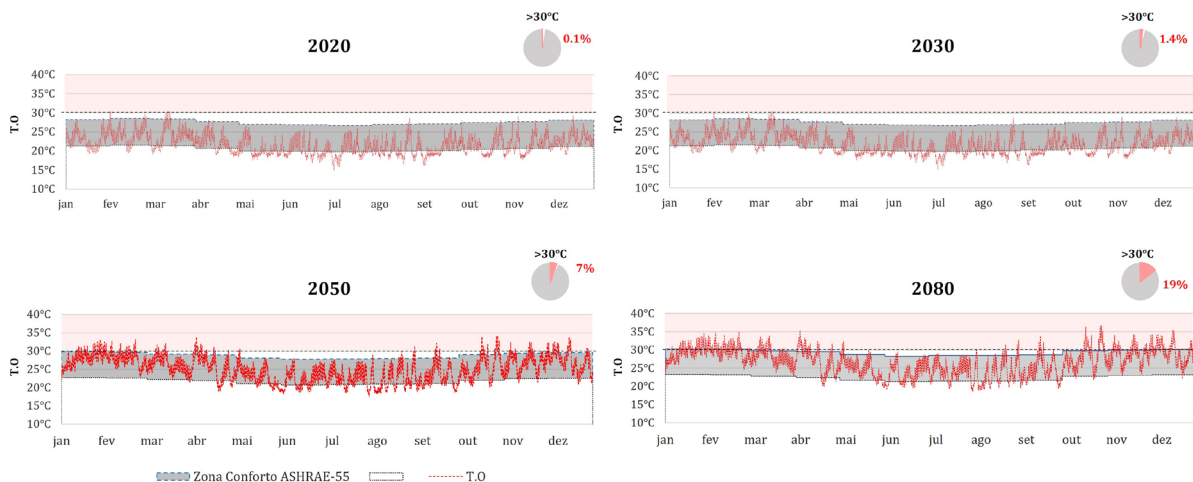


SOLUÇÕES: ENTRE PAVIEMNTOS - MIOLO | CRUZADA
orientação NE; 35% wwr; 6m profund. de planta; 2.6m
p.d; 1.5m de sombreamento; massa pesada; sem entorno

Figura 8.5 | Ilustração dos modelos tridimensional do pior caso e do melhor caso | Fonte: autoral

Gráfico 8.23 | Gráfico das séries anuais dos percentuais de conforto - Cenários Presentes e Futuros

MELHOR CASO (8) | DESEMPENHO INTEGRADO



PIOR CASO (2) | DESCONFORTO POR CALOR

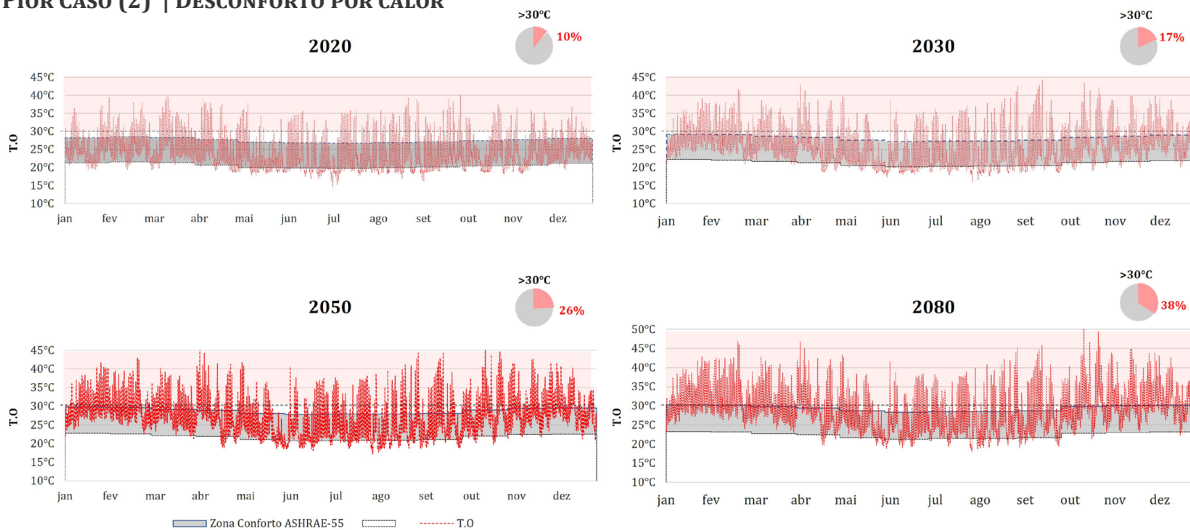
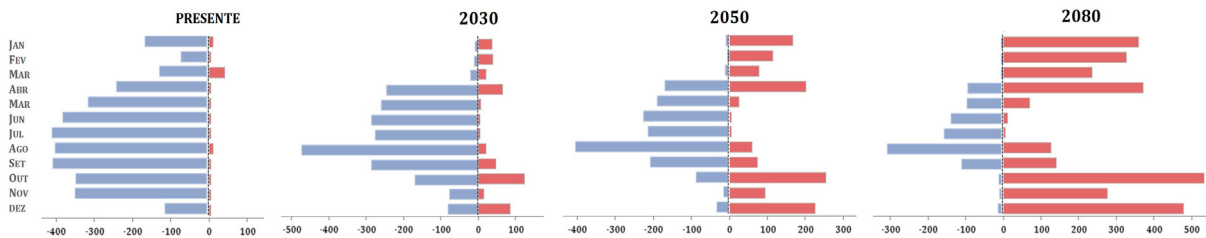
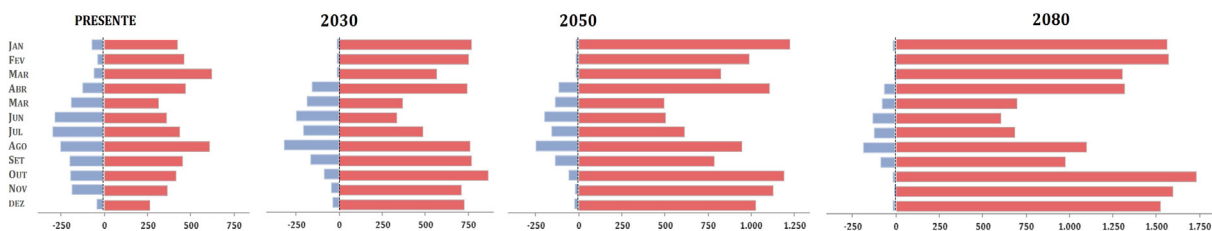


Gráfico 8.24 | Graus-horas do pior e melhor caso - Cenários Presentes e Futuros

MELHOR CASO (8) | DESEMPENHO INTEGRADO



PIOR CASO (2) | DESCONFORTO POR CALOR



8.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A discussão dos resultados permitiu a construção de uma reflexão crítica acerca do desempenho termo luminoso dos microapartamentos, extrapolando as avaliações para cenários futuros. Demonstrou-se a relevância do uso de estratégias passivas adequadas ao clima para a promoção do conforto do usuário e para a eficiência energética dos microapartamentos. Ainda, evidenciou-se o impacto das soluções adotadas em cenários futuros que podem resultar em prejuízos significativos na saúde e no bem-estar do usuário.

Por fim, detalhou-se as interações e as relevâncias das estratégias diante do contexto abordado, identificando as soluções preponderantes na promoção do conforto de microapartamentos. O estudo exploratório do universo de soluções relacionado ao conforto desses ambientes, mesmo em etapa preliminar de projeto, evidenciou o potencial de ganho ou de perda da qualidade do ambiente interno dependendo do conjunto de soluções adotadas. Assim, comprovou-se a possibilidade de se tomar decisões orientadas no início do processo de projeto ao fornecer informações que permitam a exploração do universo de soluções de forma estruturada.

Este capítulo fornece considerações finais acerca dos achados dessa pesquisa, por meio do breve resumo dos principais resultados e a validação da hipótese principal. Também são abarcados as limitações e os possíveis desdobramentos da pesquisa. Ao longo da pesquisa demonstrou-se a relevância do tema e a importante contribuição de estudos voltados aos novos modelos de habitação com foco no conforto do usuário e na qualidade do ambiente interno.

A crescente complexidade do processo de projeto de edifícios modernos tem fomentado conhecimentos especializados que, apesar de responderem às demandas tecnológicas, afastam-se da concepção espacial e arquitetônica do ambiente construído (GONÇALVES, 2015). As questões ambientais quando tratadas como elementos constituintes do partido de projeto e do exercício da arquitetura demonstram-se mais eficientes do que quando abordadas como sistemas adjacentes ao desenho do espaço. Assim, a elaboração de instrumentos projetuais que fomentem a inserção das condicionantes de conforto termo-luminoso no início do processo de projeto é uma importante contribuição à promoção de espaços residenciais compactos com melhor qualidade ambiental, eficiência energética e menor emissão de carbono.

O objetivo da pesquisa foi alcançado, ao constatar a capacidade de orientar as definições das estratégias de conforto termo-luminosas dos microapartamentos ainda nas fases iniciais do processo de projeto. Comprovou-se que a exploração de forma estruturada do universo de soluções, pertinentes a etapa de concepção do partido arquitetônico, permite tomadas de decisões informadas de projeto garantindo o nível de desempenho integrado desejado. Ainda, o projeto exploratório tem grande valia ao processo de projeto por fornecer um conhecimento aprofundado e constado das interações entre os parâmetros e seus impactos no desempenho, o que foi demonstrado na matriz de interação.

Ressalta-se que o desempenho é resultante de uma complexa dinâmica entre diversas variáveis e o objetivo da pesquisa não é criar respostas universais, mas facilitar a identificação das causas e efeitos dos conjuntos de soluções possíveis para que nas etapas iniciais de projeto as definições sejam pautadas na qualidade do ambiente interno. Logo, busca-se contribuir para a propagação e democratização de uma cultura arquitetônica que concilie condicionantes ambientes ao partido arquitetônico.

Tendo em vista os graves problemas ambientais enfrentados por nosso planeta, a introdução de uma cultura arquitetônica que considere relevante os condicionantes ambientais parece urgente e atual (GONÇALVES, 2015).

9.1. VALIDAÇÃO DA HIPÓTESE

Os resultados obtidos e apresentados nos capítulos 7 e 8 comprovaram a hipótese

inicial de que há correlação entre as premissas de implantação (entorno, orientação e posição da unidade no edifício) e os parâmetros de projeto arquitetônico (porcentagem de abertura de fachada, profundidade de planta, pé-direito, ventilação, massa térmica e sombreamento) que permite condicionar uma matriz de avaliação das estratégias de conforto termo-luminoso a ser aplicada na etapa inicial do processo de projeto.

A hipótese mostrou-se válida a partir da viabilidade da construção de duas matrizes de avaliação das estratégias de conforto: a do grau de relevância e da interação entre os parâmetros. Assim conclui-se que:

1. É possível construir as matrizes de avaliações das estratégias de conforto a partir de definições preliminares de projeto, característico das etapas de concepção do partido arquitetônico. Os parâmetros de projeto arquitetônico inseridos como variáveis de entrada do modelo parametrizado e que serviram de base de dados às matrizes levaram em consideração definições bastante preliminares.
2. A partir desses dados, comprovou-se a correlação entre as premissas de implantação e os parâmetros de projeto por meio dos resultados das regressões multivariadas. Obteve-se para todas as análises de regressão realizadas valores de ρ inferiores a 0.05, atestando que há relação estatisticamente significativa entre as variáveis de entrada e de saída.

9.2. PRODUTOS

Ao longo da pesquisa os resultados encontrados forneceram os seguintes produtos:

(I) A reflexão crítica dos atuais microapartamentos em relação ao desempenho dos espaços compactos e seus impactos na saúde e no bem-estar dos usuários. Os resultados dos levantamentos de campos demonstraram a ineficiência da envoltória dessas unidades, que perpetuam soluções inadequadas à qualidade do ambiente interna e comprometem a eficiência energética. Destaca-se como solução questionável frequentemente adotada pelo mercado, o elevado percentual de vidro na fachada, que tende a ser constituído por portas de correr de vidro, sem a integração de elementos de sombreamento com ventilação. Os dados resultantes do modelo corroboraram para tal análise, uma vez que apontaram o elevado percentual de vidro na fachada como o principal impacto negativo ao desempenho das unidades, junto com a alteração do pé-direito.

(II) A criação de um robusto banco de dados acerca das avaliações preliminares do conforto termo-luminoso de espaços compactos. Tal banco de dados pode ser analisado de diversas formas e fornecer informações importantes tanto para o desenvolvimento de projetos de edifícios residenciais, seja novos ou retrofits, além de contribuir à

elaboração de políticas públicas com foco em espaços residenciais.

(III) A metodologia descrita e aplicada nesta pesquisa para avaliação de estratégias de conforto termo-luminoso no início do processo de projeto provou-se ser adequada a orientação da tomada de decisão e a exploração do universo de soluções arquitetônicas. Metodologia que pode ser replicável à outras tipologias de projeto que sejam pautadas em estratégias passivas para promoção do conforto.

(IV) O tratamento estatístico dos dados e as matrizes de decisão das estratégias de conforto termo-luminoso, de relevância e de interação indicaram a capacidade da metodologia utilizada de identificar:

a. A importância dos parâmetros de entrada, seja de implantação ou de projeto, na composição do desempenho. Quanto a importância, diante das premissas adotadas para avaliação dos microapartamentos, a massa não apresentou impacto significativo nos resultados, inclusive sendo em alguns casos irrelevantes às avaliações iniciais. Esta descoberta contribui para a simplificação do modelo e para elucidar decisões de projeto. Quanto à orientação, este parâmetro também apresentou pouca influência nos resultados do SRRC e Pareto, no entanto, na matriz de relevância, a maioria das restrições de soluções são verificadas em orientações do quadrante oeste, maior insolação e na face sul, menor acesso ao sol.

b. A interação entre os parâmetros, que possuem a capacidade de responder as indagações dos projetistas quanto aos impactos das alterações entre as soluções de projeto no desempenho. A matriz de interação, fruto das regressões multivariadas, representa o impacto entre as alterações dos parâmetros e indicou como predominante ao desempenho integrado parâmetros que interferem na área de vidro e no volume de ar interno. Além de indicar a magnitude dos impactos das interações, também informa se estas irão interferir positiva ou negativamente nos resultados.

(V) As análises de contextos climáticos futuros reforçaram a importância de considerar as mudanças climáticas na elaboração dos projetos atuais. O desempenho alcançado nos piores casos é alarmante, indicando grandes prejuízos a saúde e ao bem-estar do usuário, que será dependente de sistemas ativos para alcançar o conforto. Ainda, os resultados indicaram a necessidade de modelagem do universo de soluções considerando climas futuros, para comparação entre as soluções que se apresentam mais adequadas no presente e no futuro.

(VI) As análises de contextos climáticos futuros também indicaram uma grande contribuição da ventilação natural. Os casos com o aumento da movimentação de ar, por meio da ventilação cruzada demonstraram uma elevada capacidade de atenuar

as temperaturas operativas internas, além de auxiliar na qualidade do ar interno.

9.3. LIMITAÇÕES E DESDOBRAMENTOS

A pesquisa descrita nesta tese resultou em uma série de conclusões que podem ser úteis tanto para a academia quanto para a indústria da construção. No entanto, observou-se ao longo do desenvolvimento da pesquisa limitações, seja de premissas adotadas, seja da delimitação do problema. Assim, identificou-se como principais limitações os seguintes pontos:

- i.* Um maior número de levantamentos de campo em unidades ocupadas com foco na investigação do conforto do usuário, preferencialmente com pesquisa de pós-ocupação. Também, acredita-se ser pertinente a coleta de dados referentes ao consumo e utilização do condicionamento ativo e da iluminação artificial.
- ii.* A variação do sombreamento considerando o ângulo de sombra e a manutenção deste na variação do pé-direito. Dessa forma, fica mais evidente o efeito do sombreamento, uma vez que não há variação do ângulo de sombra quando se altera o pé-direito.
- iii.* Uma avaliação mais aprofundada dos efeitos da ventilação natural no conforto térmico dos microapartamentos, por meio da integração de simulações de dinâmicas dos fluídos.
- iv.* Adicionar a variação de materiais que possam ser mais relevantes ao desempenho termo-luminoso, como o fator solar do vidro e a absorvância das fachadas externas. Foi considerado a massa térmica, mas esta demonstrou-se ser pouco impactante ao desempenho integrado.

Também é de grande relevância a realização de pesquisas futuras para apoiar ainda mais alguns dos resultados da pesquisa e ampliar a sua aplicabilidade, como:

Simulações parametrizadas do modelo desenvolvido, considerando os 73.... cenários, para contextos climáticos futuros.

Criação de metamodelos para espaços residenciais a partir do modelo existente, desenvolvido na pesquisa.

Aplicabilidade para outras tipologias residenciais, a partir do ajuste das cargas internas de acordo com o uso do ambiente abordado. Na pesquisa a carga interna considerou um uso misto, ou seja, dormitório e sala integrados e, portanto, maior ao conjugar dois usos.

Aplicabilidade da metodologia para diferentes tipologias de edifícios como instrumento para auxiliar na tomada de decisão nos estágios iniciais do processo de projeto.

10. Bibliografia

BIBLIOGRAFIA

ALVES, C.A. A produção recente de edifícios residenciais em São Paulo: desempenho e conforto térmico no contexto urbano e climático em transição. 2019. 247 f. 2019. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)-Curso de Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALUCCI, M.P. Manual para dimensionamento de aberturas e otimização da iluminação natural na arquitetura. FAUUSP, São Paulo, 2006.

ANITELLI, F. [Re] produção?: Repercussões de características do desenho do edifício de apartamentos paulistano em projetos empreendidos no Brasil. Dissertação Universidade de São Paulo, 2015.

ASSIS, E.S de; PEREIRA, I.M. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. *Ambiente construído*, v. 10, n. 1, p. 31-51, 2010.

AULICIEMS, A. Psycho-physiological criteria for global thermal zones of building design. *Biometeorol*, v.26, 1981.

AYMONIMO, C. *La vivienda racional*. Ed. Gustavo Gili SA, Barcelona, 1973.

BECKER, R.; PACIUK, M. Thermal comfort in residential buildings—failure to predict by standard model. *Building and Environment*, v. 44, n. 5, p. 948-960, 2009.

BELLIA, L. et al. On the interaction between lighting and thermal comfort: An integrated approach to IEQ. *Energy and Buildings*, v. 231, 2021

BITTENCOURT L. Arquitetura da adaptação. In: GONÇALVES, J.C.S.; BODE, K. *Edifício ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

BRANDÃO, R.S. Acesso ao Sol e à Luz Natural: Avaliação do impacto de novas edificações no desempenho térmico, luminoso e energético do seu entorno, Dissertação de Mestrado, USP, 2004.

BRANDÃO, D.Q. Diversidade e potencial de flexibilidade de arranjos espaciais de apartamentos: uma análise do produto imobiliário brasileiro. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, 2002.

BRAVO, G.; GONZÁLEZ, E. Thermal comfort in naturally ventilated spaces and under indirect evaporative passive cooling conditions in hot–humid climate. *Energy and Buildings*, v. 63, p. 79-86, 2013.

BAKER, N.; STEEMERS, K. *Daylight design of buildings*. James and James Editors, London, 1998.

BAY, J.H; ONG, B. L. *Tropical sustainable architecture*. Routledge, 2007.

BRE, F. et Al. Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 133, pp.853-866, 2016

BONDUKI, N. G. "Origens da habitação social no Brasil." *Análise social*, 1994; p711-732.

BOUBEKRI, M. *Daylighting, architecture and health*. Routledge, 2008.

CASELLI, C. K. 100 anos de habitação mínima: ênfase na Europa e Japão. Tese de Doutorado, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2008.

CHINAZZO, G. et al. Quality criteria for multi-domain studies in the indoor environment: Critical review towards research guidelines and recommendations. *Building and Environment*, 2022.

CHRISTOFFERSEN, J.; WIENOLD, J., Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and buildings*, 38(7), 743-757, 2006.

COHEN, Maurie J. New conceptions of sufficient home size in high-income countries: Are we approaching a sustainable consumption transition?. *Housing, Theory and Society*, v. 38, n. 2, p. 173-203, 2021.

- COSTA, H.S.M. Desenvolvimento urbano sustentável: uma contradição de termos? Anais: Encontros Nacionais da ANPUR, p.26-8, 2013
- CRAWLEY, Drury. B. et al. EnergyPlus: New capabilities in a whole-building energy simulation program. In: Proceedings of building simulation. p. 51-58, 2001
- DE DEAR, R.J. de; BRAGER, G.; COOPER, D. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference /Discussion. ASHRAE transactions, v. 104, p. 145, 1998.
- DE DEAR, R.J; BRAGER, G.S. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. Energy and buildings, v. 27, n. 1, 1998.
- DE DEAR, R. Thermal comfort in practice. Indoor air, v. 14, n. s 7, p. 32-39, 2004.
- DE DEAR, R. The theory of thermal comfort in naturally ventilated indoor environments-“the pleasure principle”. International Journal of Ventilation, v. 8, n. 3, p. 243-250, 2009.
- DENG, S. et Al. Air-conditioning for sleeping environments in tropics and/or sub-tropics–A review. Energy, v. 51, p. 18-26, 2013.
- DOUGLAS-SMITH, D.et Al. Certain trends in uncertainty and sensitivity analysis: An overview of software tools and techniques, Environmental Modelling & Software, Volume 124, 2020, 104588, ISSN 1364-8152, 2020
- DUSSAULT, J.M.I; GOSSELIN, L. Office buildings with electrochromic windows: A sensitivity analysis of design parameters on energy performance, and thermal and visual comfort. Energy and Buildings, v. 153, 2017.
- EMMANUEL, M. R. An urban approach to climate-sensitive design: strategies for the tropics. Taylor & Francis, 2005.
- ELTAWHEEL, A.; YUEHONG, S. U. Parametric design and daylighting: A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73, 1086-1103, 2017
- FÄNGER, P.O. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. Mc. Graww Hill, New York, 1972.
- FISHER, A., 1992. Tolerances in lighting design.In:Proceed-ings of the CIE seminar on computer programs for lightand lighting. Vienna, Austria: CIE.
- FOLZ, R.R. Industrialização da habitação mínima: Discussão das primeiras experiências de arquitetos modernos–1920-1930. Cadernos de Arquitetura e Urbanismo, p.95-112, 2005.
- FRONTCZAK, M; WARGOCKI, P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. Building and environment, v. 46, n. 4, 2011.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. Manual de Conforto Térmico. Studio Nobel, 2003.
- GABBE, Charles J. Looking through the lens of size: Land use regulations and micro-apartments in San Francisco. Cityscape, v. 17, n. 2, p. 223-238, 2015.
- GALASIU, A.D. et ATIF, M.R. Applicability of daylighting computer modeling in real case studies: comparison between measured and simulated daylight availability and lighting consumption. Building and Environment, 37 (4), 363–377, 2002.
- GALVÃO, W.J.F. COPAN/SP: A trajetória de um mega empreendimento, da concepção ao uso: estudo compreensivo do processo com base na avaliação pós-ocupação. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2007.

BIBLIOGRAFIA

- GEFFNER, Thomas. Towards a smaller housing paradigm: a literature review of accessory dwelling units and micro apartments. 2018.
- GIVONI, B. Passive low energy cooling of buildings. John Wiley & Sons, 1994.
- GONÇALVES, J.C.S.; BODE, K. Edifício ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- GONÇALVES, J.C.S; VIANNA, N. S. Iluminação e arquitetura. Geros. São Paulo, 2011.
- GONZÁLEZ, J.; FIORITO, F. Daylight design of office buildings: optimisation of external solar shadings by using combined simulation methods. *Buildings*, 5(2), 560-580, 2015
- HAN, J. et al. A comparative analysis of urban and rural residential thermal comfort under natural ventilation environment. *Energy and Buildings*, v. 41, n. 2, p. 139-145, 2009.
- HAWKES D. The environmental imagination: technics and poetics of the architectural environment. Taylor & Francis; 2008.
- HEBBERT, M; JANKOVIC, V. Cities and climate change: the precedents and why they matter. *Urban Studies*, v. 50, n. 7, p. 1332-1347, 2013.
- HENSEN, J.M.L et al. Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building. *Energy*, v. 94, p. 811-820, 2016.
- HOPKINSON, R.G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. Daylighting. Heinemann, 1966.
- HOUGHTEN, E. YAGLOU; YAGLOU, C. P. ASHVE Research Report N° 673. *ASHVE Transactions*, v. 29, 1923.
- HUMPHREYS, M.A. Comfortable indoor temperatures related to the outdoor air temperature. *Building Service Engineer*, v. 44, p. 5-27, 1976.
- HYDE, R. Bioclimatic housing: innovative designs for warm climates. Earthscan, 2008.
- HYDE, R. Climate responsive design: A study of buildings in moderate and hot humid climates. Taylor & Francis, 2013.
- IPCC, Climate Change et al. Synthesis report summary for policymakers. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- IPCC, Climate Change et al. Synthesis report summary for policymakers. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.
- INDRAGANTI, M.; RAO, K. D.. Effect of age, gender, economic group and tenure on thermal comfort: A field study in residential buildings in hot and dry climate with seasonal variations. *Energy and buildings*, v. 42, n. 3, p. 273-281, 2010.
- KARYONO, K et al. The adaptive thermal comfort review from the 1920s, the present, and the future. *Developments in the Built Environment*, v. 4, p. 100032, 2020.
- LAMBERTS, R; DUTRA, L; PEREIRA, F.O.R. Eficiência Energética na Arquitetura. PW Editores, São Paulo, 1997.
- LAMBERTS, R.; GOMES, P.S. O estudo do clima urbano e legislação urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros—MG. *Ambiente Construído*, v. 9, n. 1, p. 73-91, 2009.
- LAMBERTS, R.; RUPP, R.F.; VÁSQUEZ, N.G. A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and buildings*, v. 105, 2015.
- LAMBERTS, R. Conforto e Stress Térmico. Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2014.
- LE CORBUSIER. Por uma arquitetura. 2ª edição Editora Perspectiva, São Paulo, 1997.

- LE CORBUSIER. GIRAUDOUX, J. A carta de Atenas. (1933), Hucitec-EDUSP, São Paulo, 1993.
- LEME, C.C.; MONTEIRO, L.M. Desempenho térmico no inverno dos atuais microapartamentos de planta livre em São Paulo. Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, v. 17, n. 1, p. 629-633, 2018.
- LEMOS, C.A.C. História da casa brasileira. Editora Contexto, 1989.
- LI, N et al. Field study on adaptive comfort in air conditioned dormitories of university with hot-humid climate in summer. *Energy and Buildings*, v. 119, p. 1-12, 2016.
- LIN, Z.; DENG, S. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment*, 2008.
- MAK C.M; CHEUNG H.D; XUE P. The effects of daylighting and human behavior on luminous comfort in residential buildings: A questionnaire survey. *Building and Environment*. Elsevier, 2014
- MARDALJEVIC, J. Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. *Lighting Research and Technology*, 27 (4), 181–188, 1995
- MARDALJEVIC, J. The BRE-IDMP dataset: a new benchmark for the validation of illuminance prediction techniques. *Lighting Research and Technology*, 33 (2), 117–136, 2001.
- MARDALJEVIC, J. et al. "Daylighting metrics: is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability." *Proceedings of the building simulation and optimization conference (BSO12)*, Loughborough, UK. Vol. 1011, 2012.
- MCCARTNEY, K. J.; NICOL, J. F. Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and buildings*, v. 34, 2002.
- MISHRA, A.K.; RAMGOPAL, M. Field studies on human thermal comfort—an overview. *Building and Environment*, v. 64, p. 94-106, 2013.
- MISHRA, A. K.; LOOMANS, M. G. L. C.; HENSEN, J.L.M. Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions—An overview. *Building and Environment*, v. 109, p. 82-100, 2016.
- MONTEIRO, L.M. Arquitetura da adaptação. In: GONÇALVES, J.C.S.; BODE, K. *Edifício ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. "Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors." *Energy and buildings* 38.7: 905-913, 2006.
- NICOL, F.; HUMPHREYS, M.; ROAF, S. *Adaptive thermal comfort: principles and practice*. Routledge, 2012.
- NORTON, J. An introduction to sensitivity assessment of simulation models, *Environmental Modelling & Software*, Volume 69, 2015, Pages 166-174, ISSN 1364-8152, 2015
- NORBERG-SCHULZ, C. *Existence, space & architecture*. New York: Praeger, 1971.
- OBOLENSKY N.V; KORZIN O.A. Insolation and Sun Control in the Field of Construction: the progressive ways of their normalisation and regulation. *InCIB Symposium in Building Climatology*, p. 498-520, 1982.
- OCHOA, C. E.; ARIES, M.B.C; HENSEN, J.L.M. State of the art in lighting simulation for building science: a literature review. *Journal of Building Performance Simulation*, v. 5, n. 4, p. 209-233, 2012.
- OLESEN, B.W. 2002. Radiant floor heating in theory and practice. *ASHRAE Journal* 7:19–24.
- OLGYAY, V. *Arquitectura y Clima-manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas* (1998 ed.). Barcelona: Gustavo Gili, 1962.

BIBLIOGRAFIA

ORNSTEIN, S.W.; VILLA, S.B. Avaliação do Comportamento dos Usuários no Processo Habitacional: métodos e reflexões. Florianópolis: XI ENTAC, anais do evento, p. 1397-1407, 2006.

ØSTERGÅRD T, JENSEN RL, MAAGAARD SE. Building simulations supporting decision making in early design—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016.

QUEIROZ, F.A. Apartamento modelo: arquitetura, modos de morar e produção imobiliária na cidade de São Paulo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2008.

RACK, Florentin. *Micro-Apartments as an Emerging Real Estate Market*. Munich: European Business School, 2016.

REINHART, C; SELKOWITZ, S. Daylighting—Light, form, and people. *Energy and Buildings*, pp.715-717, 2006.

REINHART, C. Daylight performance predictions. *Building performance simulation for design and operation*, p. 235, 2011.

REINHART, C; JAKUBIEC, J.A.; "The 'adaptive zone'—A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces." *Lighting Research & Technology* 44, no. 2: 149-170, 2012.

REINHART, C.F., MARDALJEVIC, J., ROGERS, Z., *Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design*. National Research Council Canada, 2016

REINHART, Christoph. *Daylight performance predictions*. In: *Building performance simulation for design and operation*. Routledge, 2019

ROLNIK, R. Exclusão territorial e violência. *São Paulo em perspectiva*, v. 13, p. 100-111, 1999.

ROMERO, M.A. Edifício ambiental: Apresentação. In: GONÇALVES, J.C.S.; BODE, K. *Edifício ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

ROMERO- L.B, et al. Governance and policy. In ROSENZWEIG, C. et al. *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*. Cambridge University Press. New York 585–606, 2018

ROWE, P.G. *Modernity and housing*. Taylor & Francis, 1995.

SANSANIWAL, S. K.; MATHUR, J.; MATHUR, S.. Review of practices for human thermal comfort in buildings: present and future perspectives. *International Journal of Ambient Energy*, v. 43, n. 1, p. 2097-2123, 2022.

SANTAMOURIS, M; ALLARD, F. *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. Earthscan, 1998.

SANTAMOURIS, M; MUMOVIC, D. *A Handbook of Sustainable Building Design and Engineering*: Routledge, 2009

SARNA I; FERDYN-GRYGIEREK J; GRYGIEREK K. Thermal Model Validation Process for Building Environment Simulation: A Case Study for Single-Family House. *Atmosphere*. 2022

SAYYAADI, H et al. Acquiring the best cooling strategy based on thermal comfort and 3E analyses for small scale residential buildings at diverse climatic conditions. *international journal of refrigeration*, v. 57, p. 112-137, 2015.

SHELLER, C.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Correções realizadas nos arquivos climáticos INMET 2012. *Laboratório de Eficiência Energética em Edificações*, Federal University of Santa Catarina., Florianópolis, Brazil, 2016.

SOMEKH, N. *A cidade vertical e o urbanismo modernizador: São Paulo, 1920-1939*. Edusp, 1997.

- SOUB, N. M.; MEMIKOĞLU, İpek. Exploring the Preferences for Micro-Apartments. *Online Journal of Art and Design*, v. 8, n. 2, p. 88-99, 2020.
- PEETERS, L. et al. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. *Applied energy*, v. 86, n. 5, p. 772-780, 2009.
- PEREIRA, F.O.R.; SOUZA, M.B. de. Apostila de conforto ambiental: Iluminação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- PEREIRA, F.O.R.; SOUZA, M.B. Janela de céu preferível: proposição de um parâmetro para controle da disponibilidade de luz natural no meio urbano. *Ambiente Construído*, p89-104, 2008.
- PEREIRA, F.O.R.; DIDONÉ, E.L. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. *Ambiente Construído*, p139-154, 2010
- PEREIRA, F.O.R.; DA FONSECA, R.W. Sequência metodológica para a estimativa da iluminação natural e suas implicações em sistemas de avaliação de desempenho de edificações. *Ambiente Construído*, v. 17, 2017.
- PEREZ, P. et Al. Modeling daylighting availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy*, v. 44, p.271-289, 1990.
- PETERSEN, S.; SVENDSEN, S.; CHRISTOFFERSEN, L. D. Simulation-based support for integrated design of new low-energy office buildings, 2011
- PETRUCCI, Celso. Balanço Do Mercado Imobiliário 2014. SECOVI – São Paulo, 2014.
- PETRUCCI, Celso. Balanço Do Mercado Imobiliário 2021. SECOVI – São Paulo, 2021.
- TEIGE, K. The minimum dwelling. MIT press, 2002.
- TRAMONTANO, M.C. Novos modos de vida, novos espaços de morar, Paris, São Paulo, Tokyo: uma reflexão sobre a habitação contemporânea. Tese de Doutorado. 1998.
- TRAMONTANO, M.C. Apartamentos, arquitetura e mercado: estado das coisas. Oficina Verticalização das cidades brasileiras, São Paulo. 2002
- TRAMONTANO, M.; BENEVENTE, V. Comportamentos & espaços de morar: leituras preliminares das e-pesquisas Nomads. In: ENTAC'04, Anais. São Paulo, 2004.
- TRIANA, M.A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Desempenho de habitações de interesse social frente às mudanças climáticas. *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, v. 16, p. 1806-1820, 2016.
- TSUDA, F.P. Conforto, adequação climática e o papel dos códigos de edificações: os desafios de São Paulo frente ao estado da arte no Brasil e no mundo. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- VILLA, S. B. "A arquitetura e o mercado imobiliário: análise da produção de apartamentos recentes na cidade de São Paulo." Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável; Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Vol. 1. No. 10. 2004.
- VILLA, S. B.; TRAMONTANO, M. Apartamento metropolitano: evolução tipológica. *Anais: Seminário de História da Cidade e do Urbanismo*, v. 6, n. 3, 2012.
- YAN, H. et al. Thermal response and thermal comfort evaluation of the split air conditioned residential buildings. *Building and Environment*, v. 221, p. 109326, 2022.
- YANG, C. et al. Evaluation on energy and thermal performance for residential envelopes in hot summer and cold winter zone of China. *Applied Energy*, v. 86, n. 10, 2009.
- YANNAS, S. Adaptive Architecturing. *Architecture & Energy*. Routledge, New York, 2013.

BIBLIOGRAFIA

ZHANG, Q.Y. et HUANG, Y.J. 2002. "Development of typical year weather files for Chinese locations", LBNL-51436, ASHRAE Transactions, Vol. 108, Part 2.

WESTPHAL, F.S.; QUEIROZ, N.; PEREIRA, F.O.R.; A performance-based design validation study on EnergyPlus for daylighting analysis. Building and Environment, Volume 183, 2020

WINSLOW, C.; HERRINGTON, L. P; GAGGE, A.P. Physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures. American Journal of Physiology-Legacy Content, v. 120, n. 1, 1937.

WARGOCKI, P.14 Ventilation, Thermal Comfort, Health and Productivity. In: SANTAMOURIS, M; MUMOVIC, D. A Handbook of Sustainable Building Design and Engineering: Routledge, 2009

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-. NBR 15215: Iluminação Natural, Rio de Janeiro, 2005.

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações, Rio de Janeiro, 2005.

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho, Rio de Janeiro, 2005.

____ASHRAE. Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering, New York, 2005.

____EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. CEN, Brussels, 2007

____ISO, 13790: Energy performance of buildings—Calculation of energy use for space heating and cooling, Brussels, 2008.

____ISO, 7726: Thermal environments-instruments and methods for measuring physical quantities, Switzerland, 2001.

____ISO Standard 7730. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, Geneva International Standards Institution, 2005.

____Illuminating Engineering Society of North America – IES LM-83-12: Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE), United State of America, 2012

____BRASIL. Lei Nº 10.257 de 10 de julho de 2001. Estatuto das Cidades, Brasil, 2001.

____LONDON. LONDON PLAN of June 2021, London, 2021.

____SÃO PAULO. Lei nº 16.642 de 25 de junho de 2017. Código de Obras e Edificações (COE), São Paulo, 2017.

____SÃO PAULO. Lei Nº 16.050 de 31 de julho de 2014. Plano Diretor Estratégico, São Paulo, 2014.

____SÃO PAULO. Lei Nº 13.885 de 25 de agosto de 2016. Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo – LPUOS, São Paulo, 2016.

____URBAN LAND INSTITUTE. The Macro View on Micro Units. Washington, DC: Urban Land Institute, 2014 <http://uli.org/report/uli-multifamily-product-councils-publish-new-research-micro-units/>.

CORESTUDIO, 2017. www.thorntontomasetti.com

ENERGY LLC, 1996-2021. <https://energyplus.net/>

LADYBUG TOOLS LLC, 2017. www.ladybug.tools

ROBERT MCNEEL, 1993-2023; www.rhino3d.com

11. Apêndice

Apêndice A

Gráficos das distribuições dos percentuais de horas anuais dentro, acima ou abaixo da faixa de iluminâncias úteis (UDI 100-3000lux) para cada estudos de cada cenários das análises de sensibilidade local.

Gráfico 9.25 | Análises individuais do Cenários de WWR (percentual de vidro na fachada)

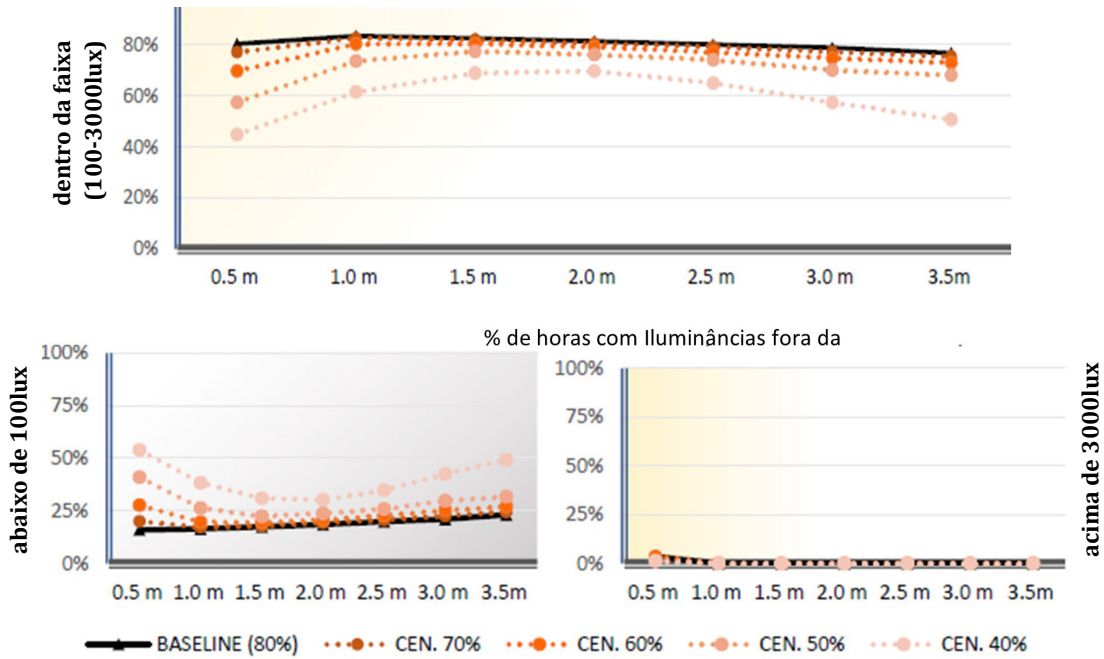


Gráfico 9.26 | Análises individuais do Cenários de Pé-direito

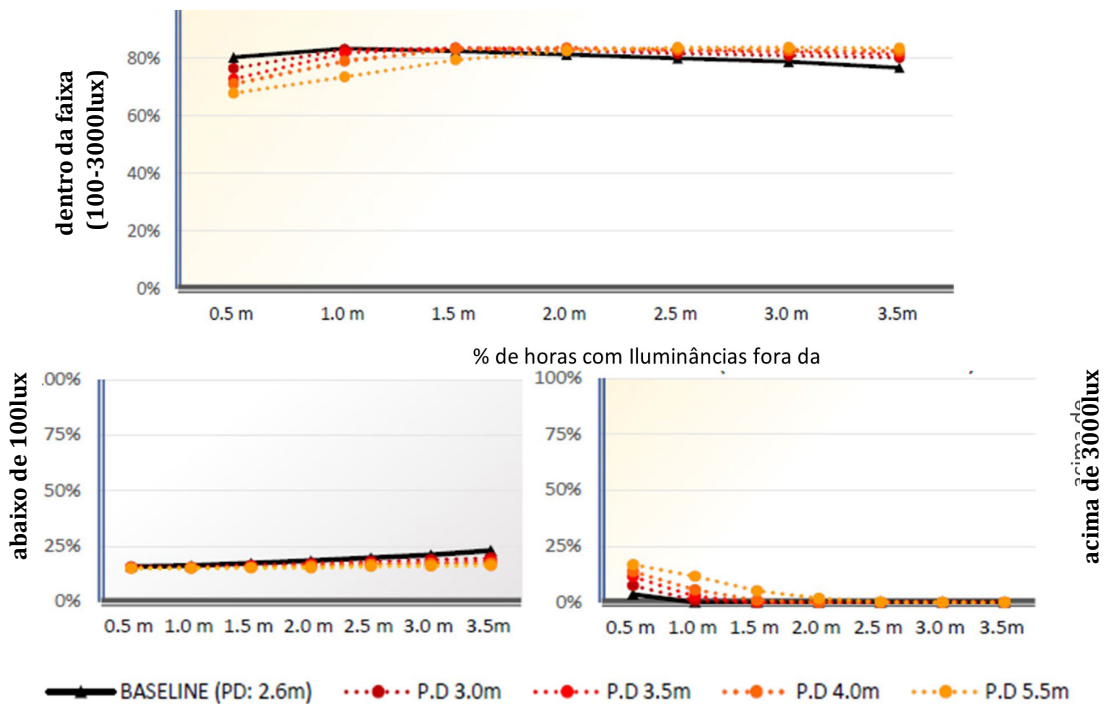


Gráfico 9.27 | Análises individuais do Cenários de Sombreamento

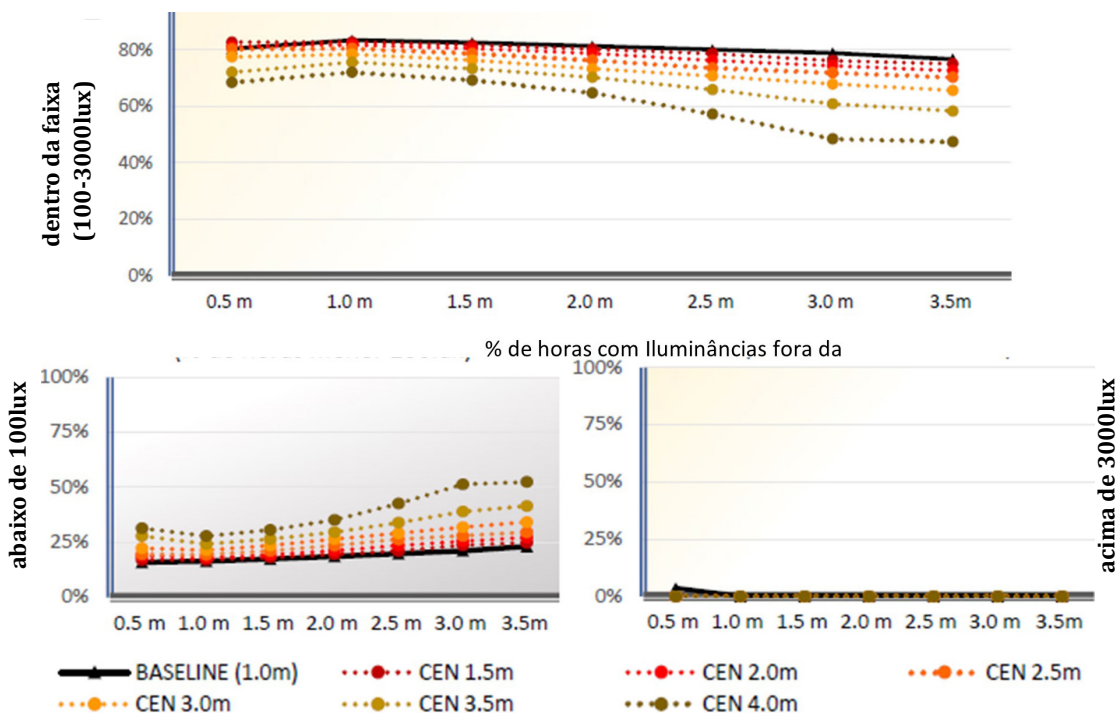


Gráfico 9.28 | Análises individuais dos cenários de orientação

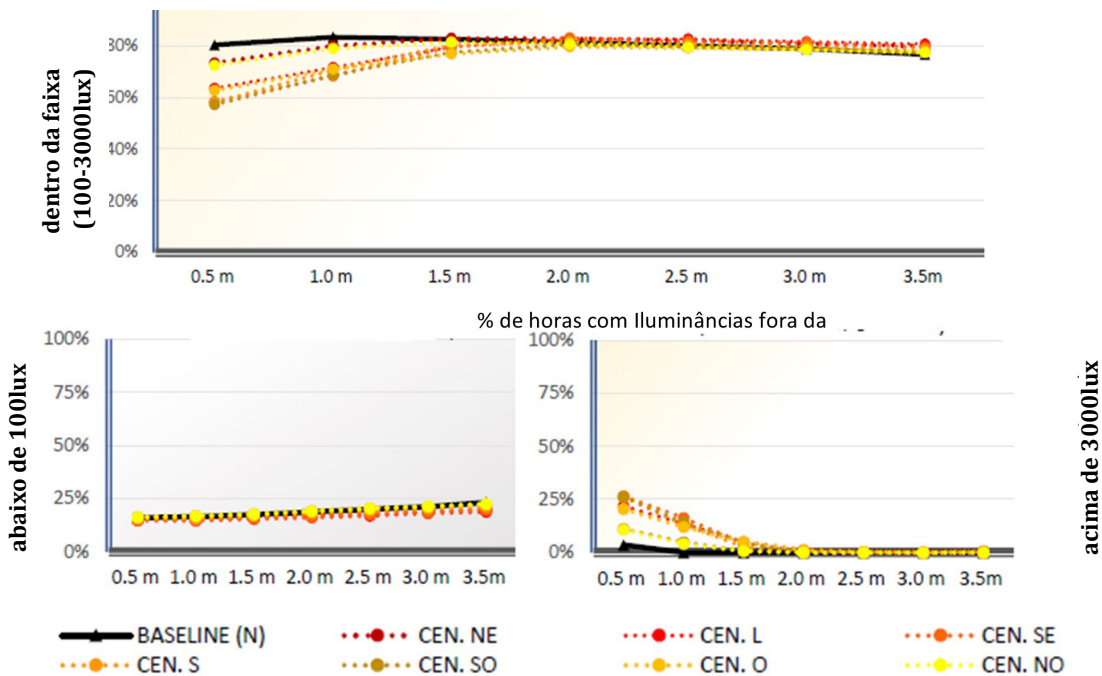


Gráfico 9.29 | Análises individuais do Cenários de Entorno

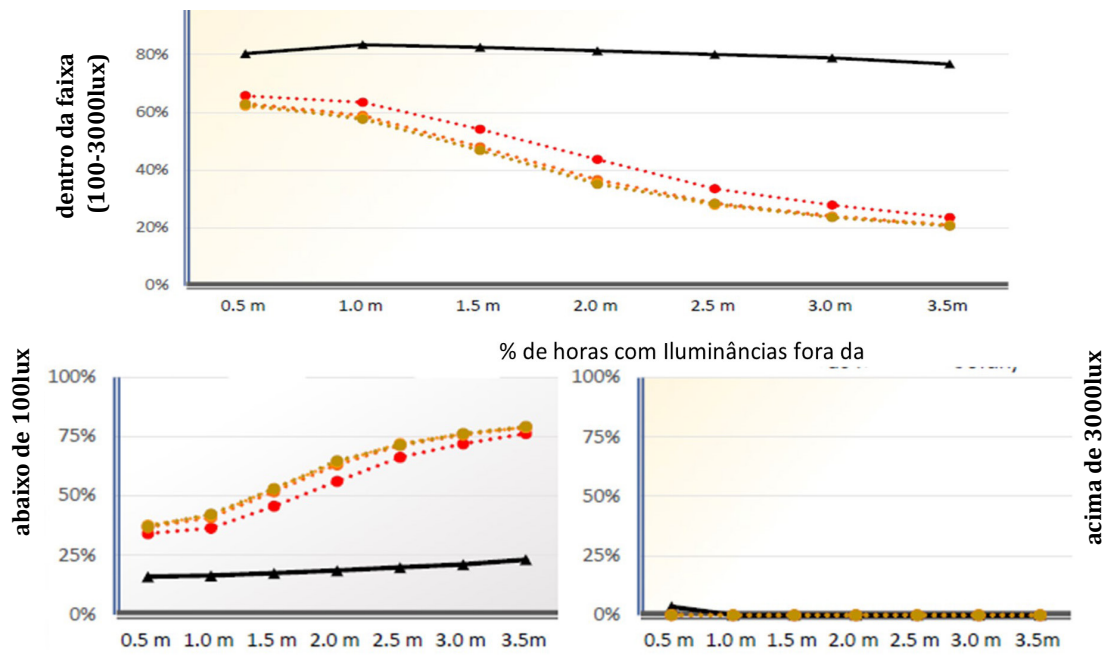


Tabela 9.11 | Base de dados para matriz de relevância - Caso 7

ENTORNO		WWR [%]				P D [m]				Planta [m]			Sombreamento			Massa		ENTORNO		WWR [%]				P D [m]				Planta [m]			Sombreamento			Massa	
3M		35	50	65	80	2,6	3	4	5,5	3,5	4,5	6	0	1,5	3	0	1	5M		35	50	65	80	2,6	3	4	5,5	3,5	4,5	6	0	1,5	3	0	1
Orientação	N	-1,0	-1,0	3,0	-1,0	3,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	2,0	-1,0	-1,0	2,0	0,0	0,0	Orientação	N	-0,2	0,3	0,1	-0,2	1,5	0,5	-1,0	-1,0	-0,8	-0,2	1,1	2,0	-1,0	-1,0	0,4	-0,4
	NO	1,0	-1,0	1,0	-1,0	2,0	0,0	-1,0	-1,0	-1,0	0,5	0,5	-0,3	-0,3	0,5	0,5	-0,5		NO	0,0	0,7	-0,2	-0,4	1,3	0,3	-0,7	-0,9	-0,6	-0,1	0,7	1,6	-0,7	-0,9	0,1	-0,1
	O	-1,0	-1,0	1,7	0,3	3,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	2,0	1,0	-1,0	0,0	0,3	-0,3		O	0,0	0,2	0,1	-0,2	0,8	0,4	-0,5	-0,7	-0,5	0,0	0,5	1,3	-0,3	-1,0	0,1	-0,1
	SO	0,2	0,6	0,2	-1,0	2,6	-0,6	-1,0	-1,0	-0,4	0,5	-0,1	1,7	-1,0	-0,7	0,4	-0,4		SO	0,0	0,2	0,1	-0,3	0,9	0,2	-0,4	-0,8	-0,5	0,0	0,5	1,4	-0,4	-1,0	0,1	-0,1
	S	-0,3	-0,1	0,3	0,1	2,8	-0,8	-1,0	-1,0	-0,5	0,3	0,2	1,5	-0,8	-0,7	0,2	-0,2		S	0,1	0,3	-0,1	-0,3	0,9	0,3	-0,4	-0,8	-0,7	-0,1	0,8	1,3	-0,3	-1,0	0,1	-0,1
	SE	-0,1	-0,3	0,6	-0,3	2,1	-0,1	-1,0	-1,0	-0,3	-0,6	0,9	1,1	-0,8	-0,3	0,3	-0,3		SE	0,2	0,2	0,1	-0,5	1,0	0,3	-0,5	-0,7	-0,7	-0,3	1,0	1,2	-0,3	-0,9	0,1	-0,1
	E	-0,7	0,8	-0,1	-0,1	1,8	0,2	-1,0	-1,0	-1,0	-0,1	1,1	1,3	-0,8	-0,5	0,4	-0,4		E	0,4	0,1	0,1	-0,5	1,0	0,3	-0,4	-0,9	-0,6	-0,1	0,7	1,6	-0,6	-1,0	0,1	-0,1
NE	-0,4	0,1	1,3	-1,0	2,4	-0,4	-1,0	-1,0	-1,0	-0,1	1,1	0,7	-1,0	0,3	0,4	-0,4	NE	0,1	0,1	0,0	-0,3	1,0	0,5	-0,5	-1,0	-1,0	0,1	0,9	2,0	-1,0	-1,0	0,1	-0,1		

Tabela 9.12 | Base de dados para matriz de relevância - Caso 8

ENTORNO		WWR [%]				P D [m]				Planta [m]			Sombreamento			Massa		ENTORNO		WWR [%]				P D [m]				Planta [m]			Sombreamento			Massa	
3M		35	50	65	80	2,6	3	4	5,5	3,5	4,5	6	0	1,5	3	0	1	5M		35	50	65	80	2,6	3	4	5,5	3,5	4,5	6	0	1,5	3	0	1
Orientação	N	-0,8	0,0	0,3	0,4	0,4	0,7	-0,1	-1,0	-0,2	0,1	0,1	1,8	-0,8	-1,0	0,0	0,0	Orientação	N	-0,4	-0,3	0,3	0,4	0,6	0,7	-0,3	-1,0	-0,2	0,1	0,1	1,5	-0,5	-1,0	0,0	0,0
	NO	-0,8	-0,1	0,3	0,5	0,2	0,1	0,2	-0,5	-0,1	-0,1	0,2	1,4	-0,4	-1,0	0,0	0,0		NO	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,0	0,2	0,1	-0,2	0,0	-0,1	0,1	1,3	-0,3	-1,0	-0,1	0,1
	O	-0,6	0,0	0,3	0,4	-0,1	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,1	1,4	-0,4	-1,0	-0,1	0,1		O	-0,4	0,0	0,2	0,2	-0,1	-0,1	0,3	-0,1	0,2	0,1	-0,3	1,1	-0,1	-1,0	0,0	0,0
	SO	-0,6	0,0	0,2	0,4	-0,1	0,1	0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,0	1,2	-0,2	-1,0	-0,1	0,1		SO	-0,2	0,0	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,1	-0,2	0,3	-0,2	-0,1	1,1	-0,2	-1,0	-0,1	0,1
	S	-0,4	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,8	0,2	-1,0	0,0	0,0		S	-0,1	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	-0,1	0,7	0,3	-1,0	0,0	0,0
	SE	-0,4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4	0,0	-0,7	0,0	0,0	0,0	1,5	-0,5	-1,0	0,1	-0,1		SE	-0,4	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,0	-0,6	0,0	-0,2	0,2	0,9	0,1	-1,0	0,0	0,0
	E	-0,7	0,3	0,2	0,2	0,6	0,4	0,0	-1,0	-0,3	0,3	0,0	1,7	-0,7	-1,0	0,0	0,0		E	-0,3	0,0	0,1	0,2	0,6	0,4	0,1	-1,0	-0,1	0,2	0,0	1,5	-0,5	-1,0	0,0	0,0
NE	-0,7	-0,1	0,5	0,4	0,5	0,6	-0,1	-1,0	-0,1	0,2	-0,1	1,8	-0,8	-1,0	0,1	-0,1	NE	-0,4	0,0	0,1	0,2	0,7	0,3	0,0	-1,0	-0,7	0,4	0,3	1,4	-0,4	-1,0	0,0	0,0		

Apêndice C

Cartilha completa para inserção das estratégias de conforto termo-luminoso no início do processo de projeto. A cartilha é organizada em introdução e em casos. A primeira parte, introdução, é composta por explicações sobre os cenários/ dados que constituem as matrizes, e de orientações da estrutura de apresentação dos dados para facilitar a leitura e o uso desta.

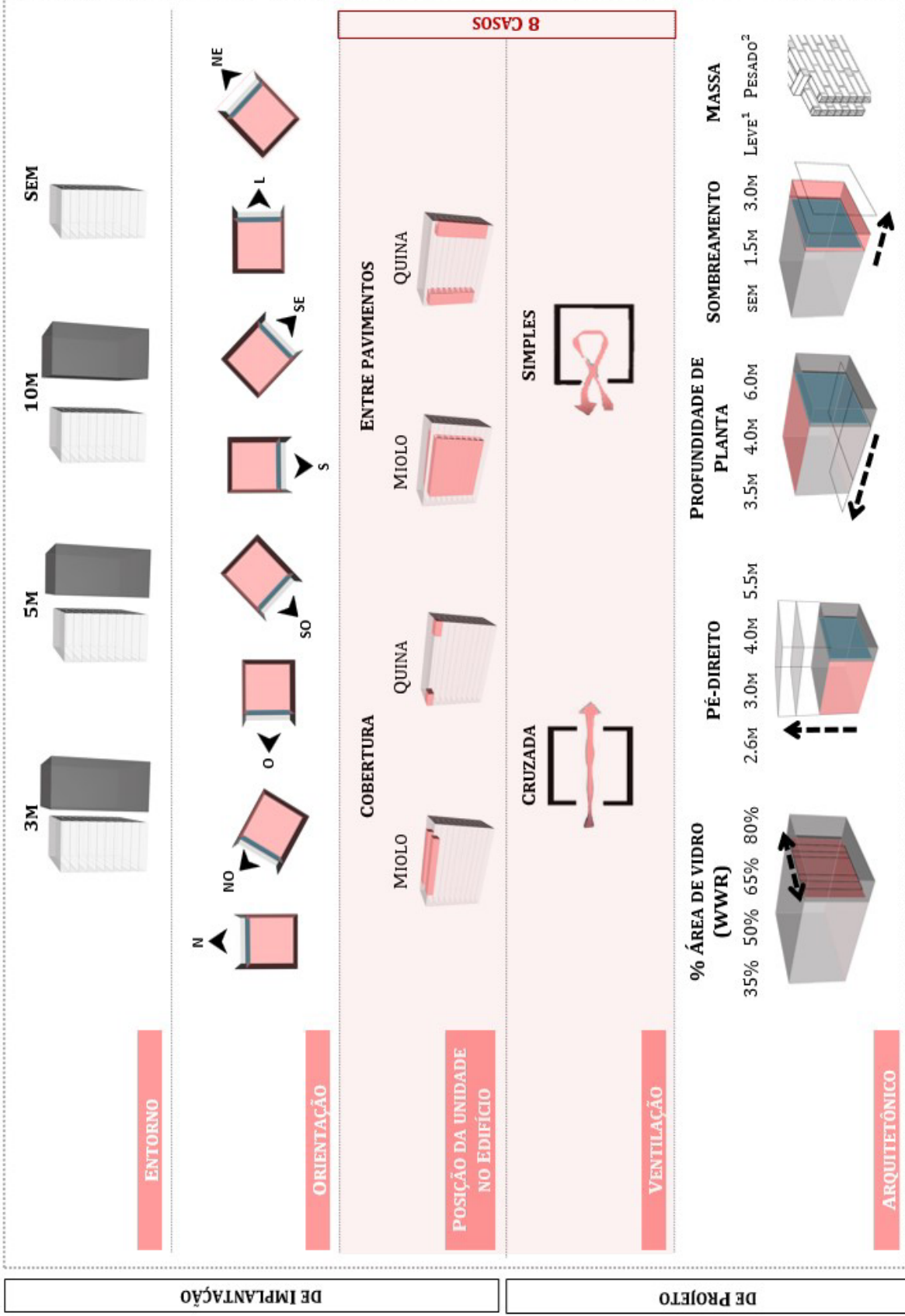
A segunda, apresenta as matrizes de relevância e interação agrupadas por casos. Cada caso, além das matrizes, também apresenta os melhores cenários de acordo com o entrono.

CARTILHA PARA INSERÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONFORTO

INÍCIO DO PROJETO

INTRODUÇÃO | PARÂMETROS DO UNIVERSO DE SOLUÇÕES AVALIADAS

CENÁRIOS AVALIADOS (73.728 combinações entre os parâmetros)



CONDIÇÕES DE OCUPAÇÃO



UNIDADE:

MICROAPARTAMENTO (20M²)



2 PESSOAS



ATIVIDADE: 108W/PER



EQUIPAMENTOS: 120W



ILUMINAÇÃO: 5W/M²



30% ABERTA*

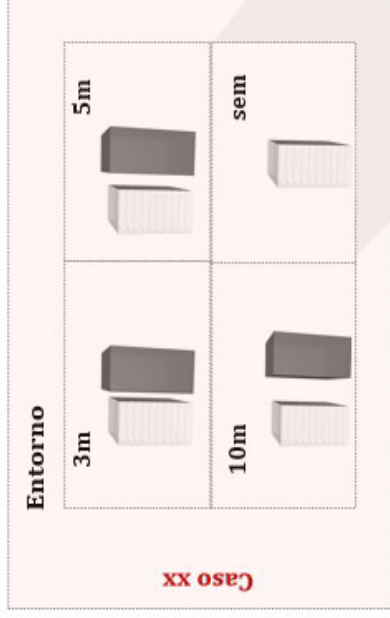
LEVE¹ : ALVENARIAS EM BLOCO CONCRETO E LAJE MACIÇA DE 12CM COM FORRO DE GESSO.

PESADO² : ALVENARIA MACIÇA DE 10CM E LAJE NERVURADA DE 18CM

* Abertura tipo porta e somente operável nos períodos ocupados

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

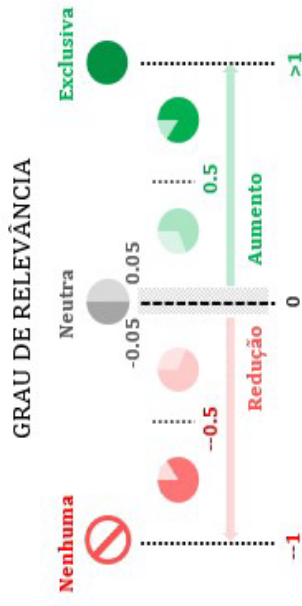
POR CASOS (8 CASOS: POSIÇÃO + VENTILAÇÃO)



Arquitetônico

% ocorrência de cada variável

LEGENDA DA MATRIZ DE RELEVÂNCIA



MÉTODO DE AVALIAÇÃO

DESEMPENHO INTEGRADO > 0.67



Considerou apenas cenários com desempenho integrado acima de 0.67

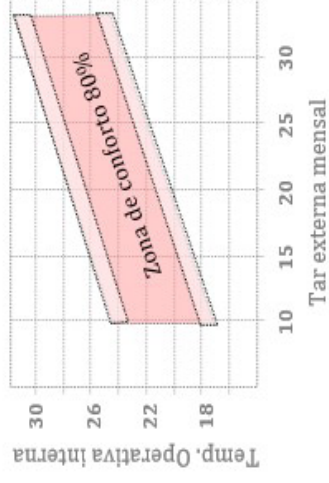
$$\text{TÉRMICA} + \text{LUZ NATURAL} = \text{DESEMPENHO INTEGRADO}$$

Horas de Conforto (HC) + Horas de UDI

$$\text{Desempenho Integrado} = \frac{(HC * 0.7 + UDI * 0.3)}{100}$$

TÉRMICA | HC

Índice Modelo Adaptativo ASHRAE-55
Faixa Zona de conforto de 80% de aceitabilidade
Resultado Percentual de horas anuais dentro da faixa.



ILUMINAÇÃO | UDI

Iluminâncias Úteis da Luz diurna (UDI)
 100lux - 3000lux
 Percentual de horas anuais dentro da faixa.

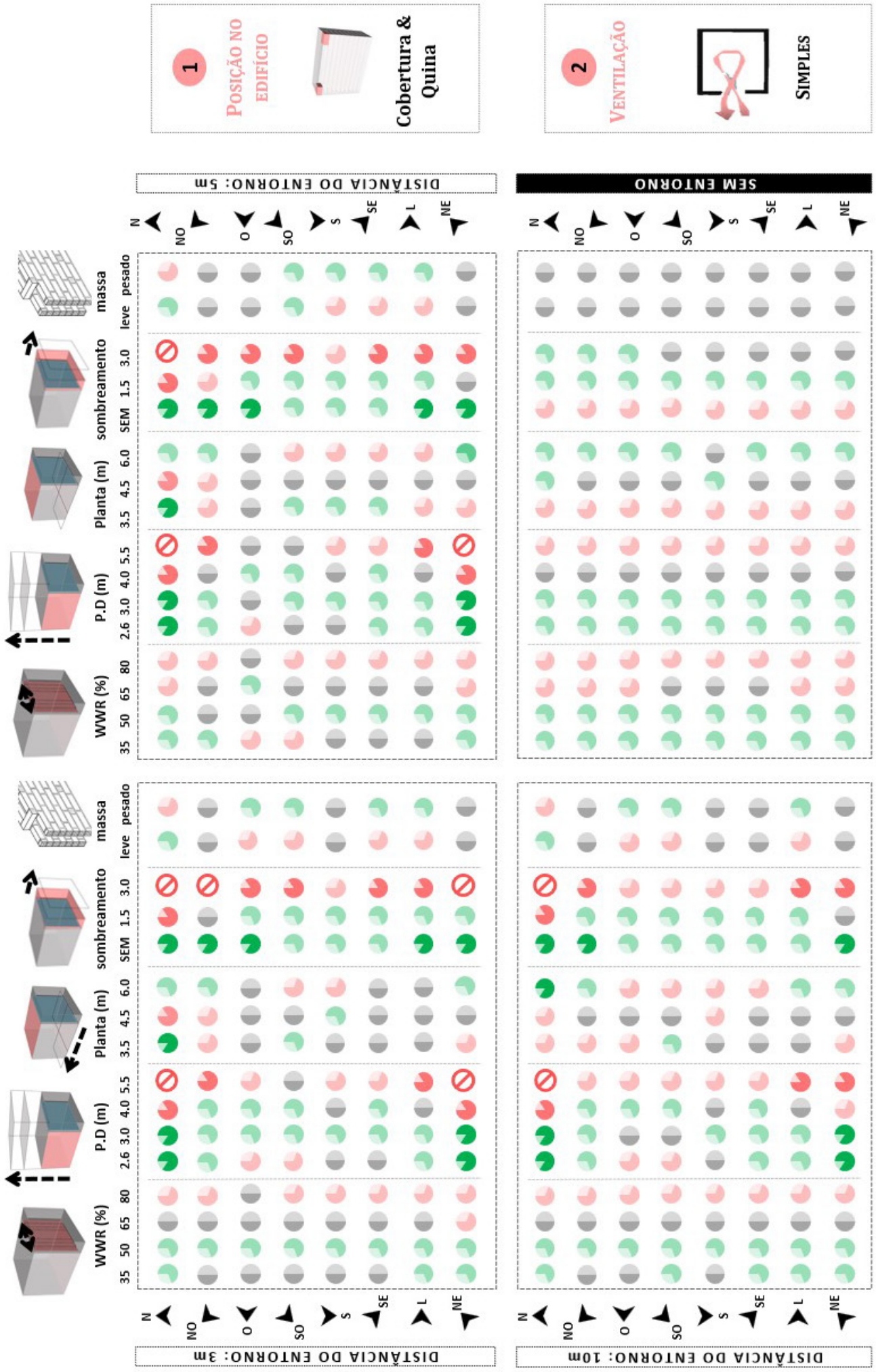


CASO 1

UNIDADE LOCADA NA QUINA DA COBERTURA

&

COM VENTILAÇÃO SIMPLES

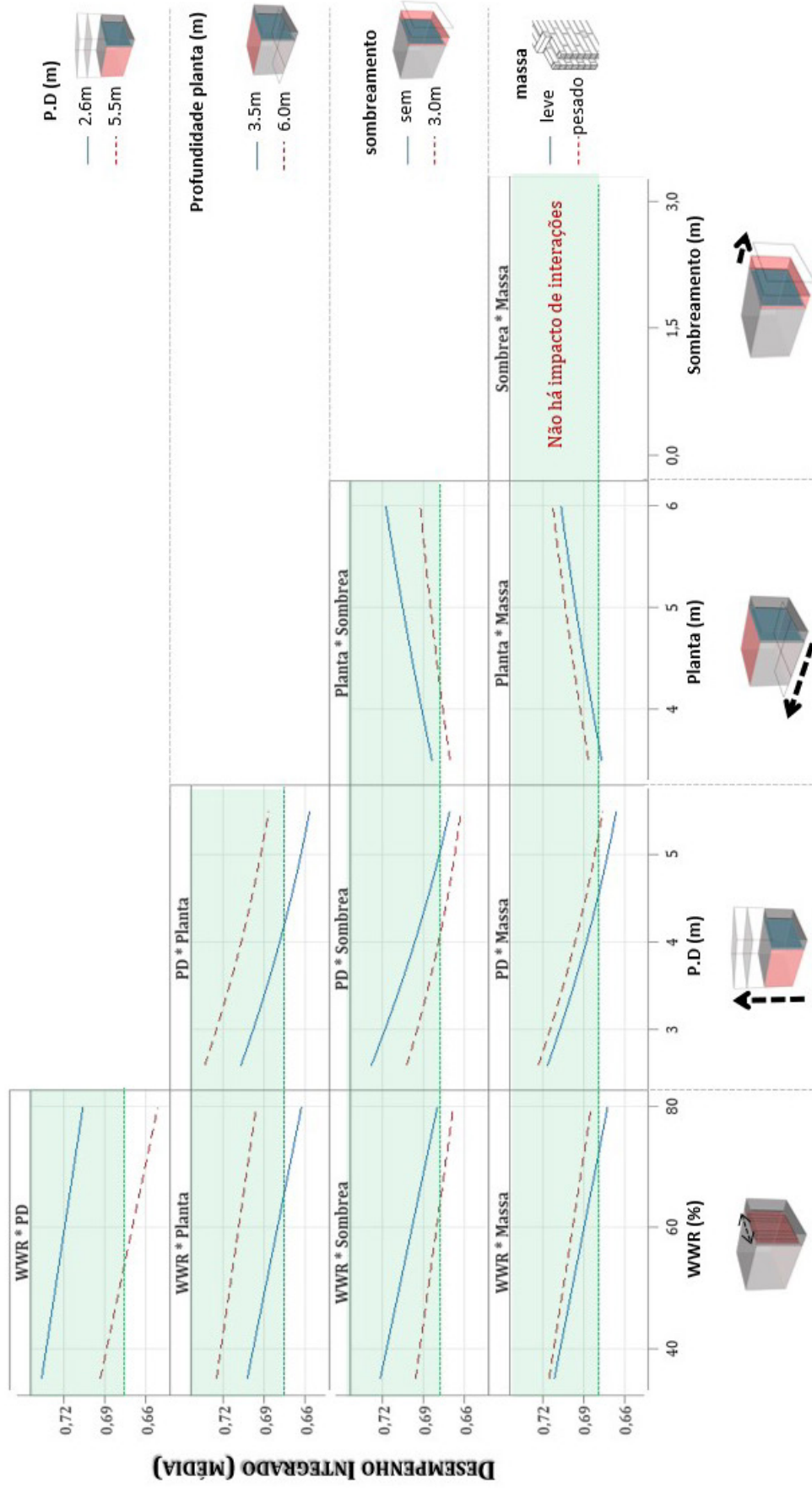


Grau de relevância de cada solução dentro os cenários que apresentaram desempenho integrado acima de 0.67

Descreve como o desempenho Integrado muda quando há alterações de duas variáveis.

Desempenho Integrado > 0.67

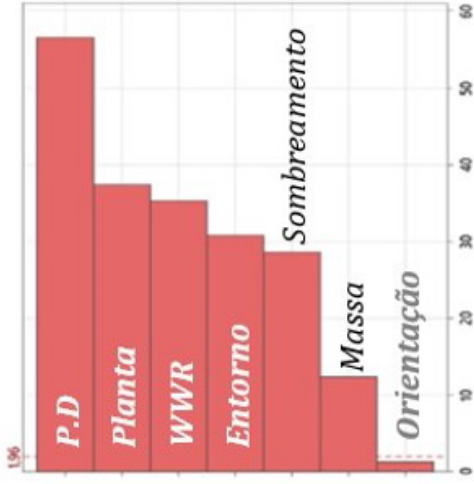
IMPACTO DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS



MELHORES SOLUÇÕES PARA CADA ENTORNO

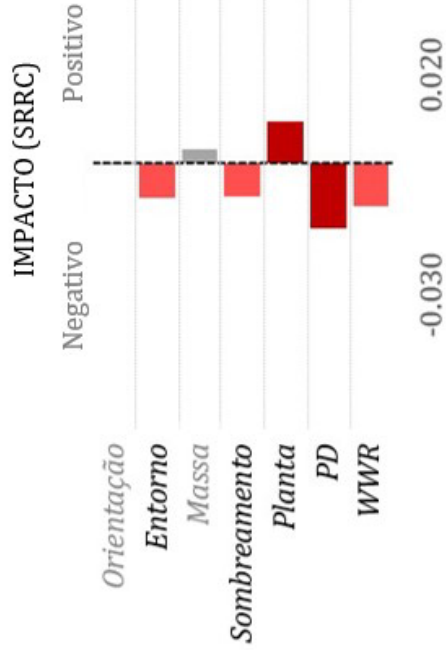
Face	WWR	P.D	Planta	Somb.	Massa	Térmica HC	Luz UDI	D.I Desempenho Integrado
ENTORNO								
3M								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.3%
S	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	70%	97%	77.9%
L	35%	2.6m	6.0m	Sem	leve	69%	96%	77.3%
5M								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	70%	97%	78.2%
SE	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	71%	96%	78.1%
L	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	69%	98%	78%
10M								
N	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.4%
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.3%
L	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	70%	98%	78.2%
SEM								
N	35%	2.6m	6.0m	1.5m	pesado	71%	98%	79.1%
N	35%	2.6m	6.0m	1.5m	leve	71%	98%	78.8%
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	99%	78.7%

IMPACTO DAS SOLUÇÕES NO D.I



1
POSIÇÃO NO EDIFÍCIO

Cobertura & Quina



2
VENTILAÇÃO

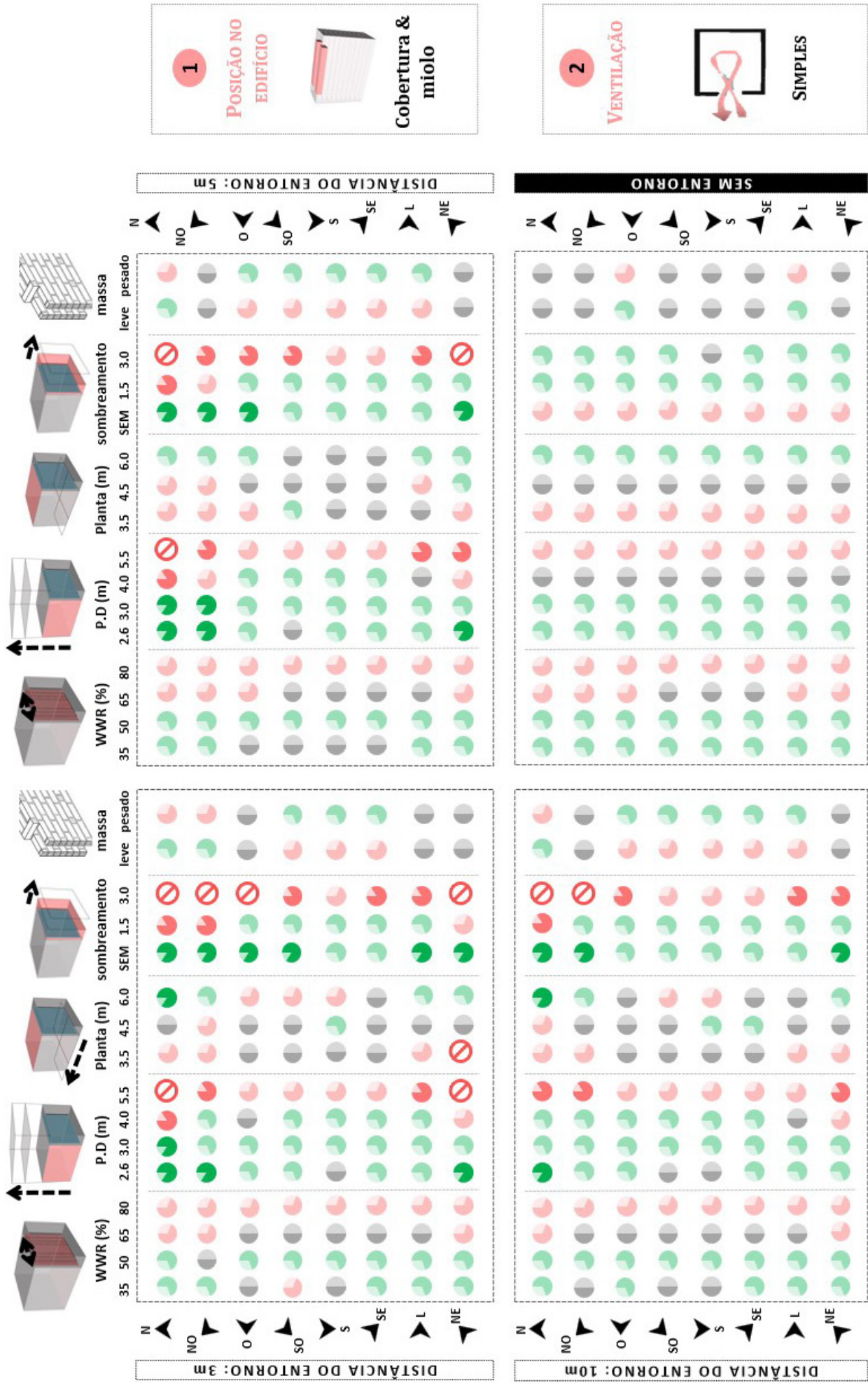
SIMPLES

CASO 2

UNIDADE LOCADA NO MIOLO DA COBERTURA

&

COM VENTILAÇÃO SIMPLES

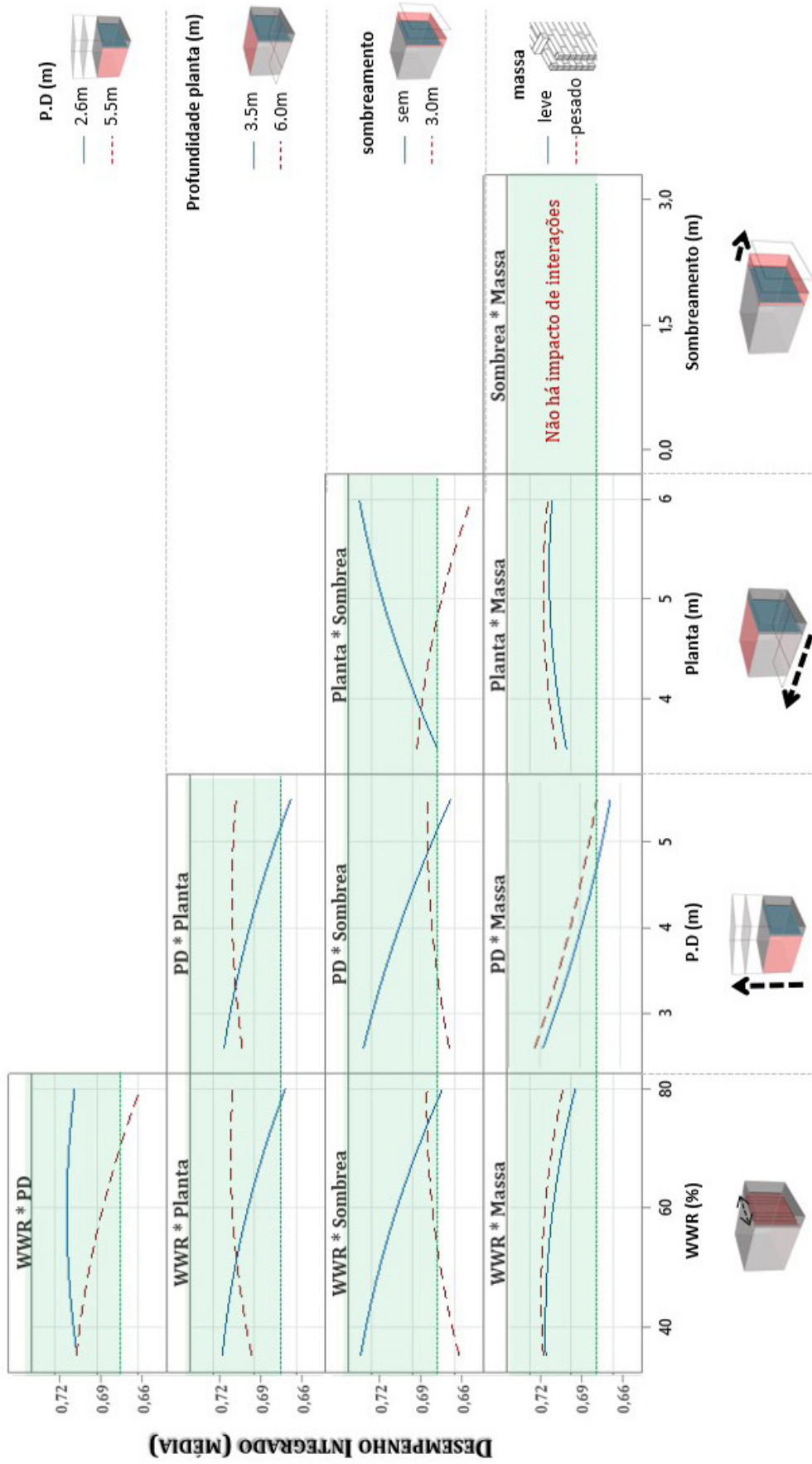


Grau de relevância de cada solução dentro os cenários que apresentaram desempenho integrado acima de 0.67

Descreve como o desempenho Integrado muda quando há alterações de duas variáveis.

Desempenho Integrado > 0.67

IMPACTO DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS



1

POSIÇÃO NO EDIFÍCIO

CoBERTura & miolo

2

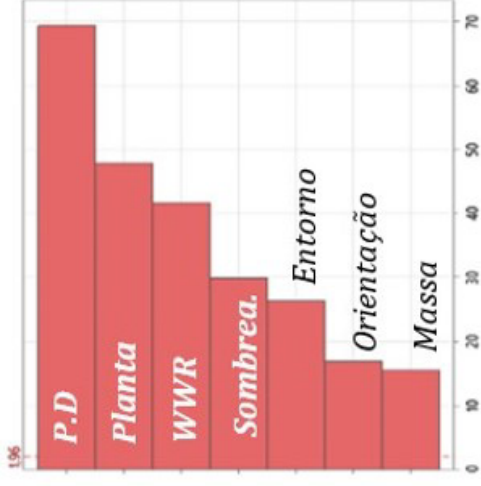
VENTILAÇÃO

SIMPLES

MELHORES SOLUÇÕES PARA CADA ENTORNO

Face	WWR	P.D	Planta	Somb.	Massa	Térmica HC	Luz UDI	D.I Desempenho Integrado
ENTORNO 3M								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.3%
S	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	70%	97%	77.9%
L	35%	2.6m	6.0m	Sem	leve	69%	96%	77.3%
ENTORNO 5M								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	70%	97%	78.2%
SE	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	71%	96%	78.1%
L	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	69%	98%	78%
ENTORNO 10M								
N	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.4%
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.3%
L	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	70%	98%	78.2%
ENTORNO SEM								
N	35%	2.6m	6.0m	1.5m	pesado	71%	98%	79.1%
N	35%	2.6m	6.0m	1.5m	leve	71%	98%	78.8%
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	99%	78.7%

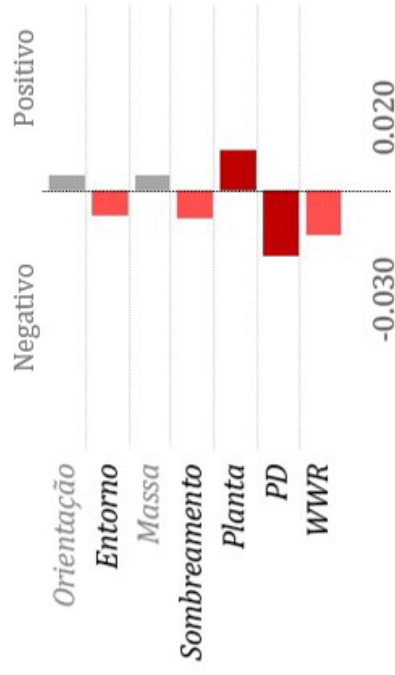
IMPACTO DAS SOLUÇÕES NO D.I



1
POSIÇÃO NO EDIFÍCIO

Cobertura & miolo

IMPACTO (SRRC)



2
VENTILAÇÃO

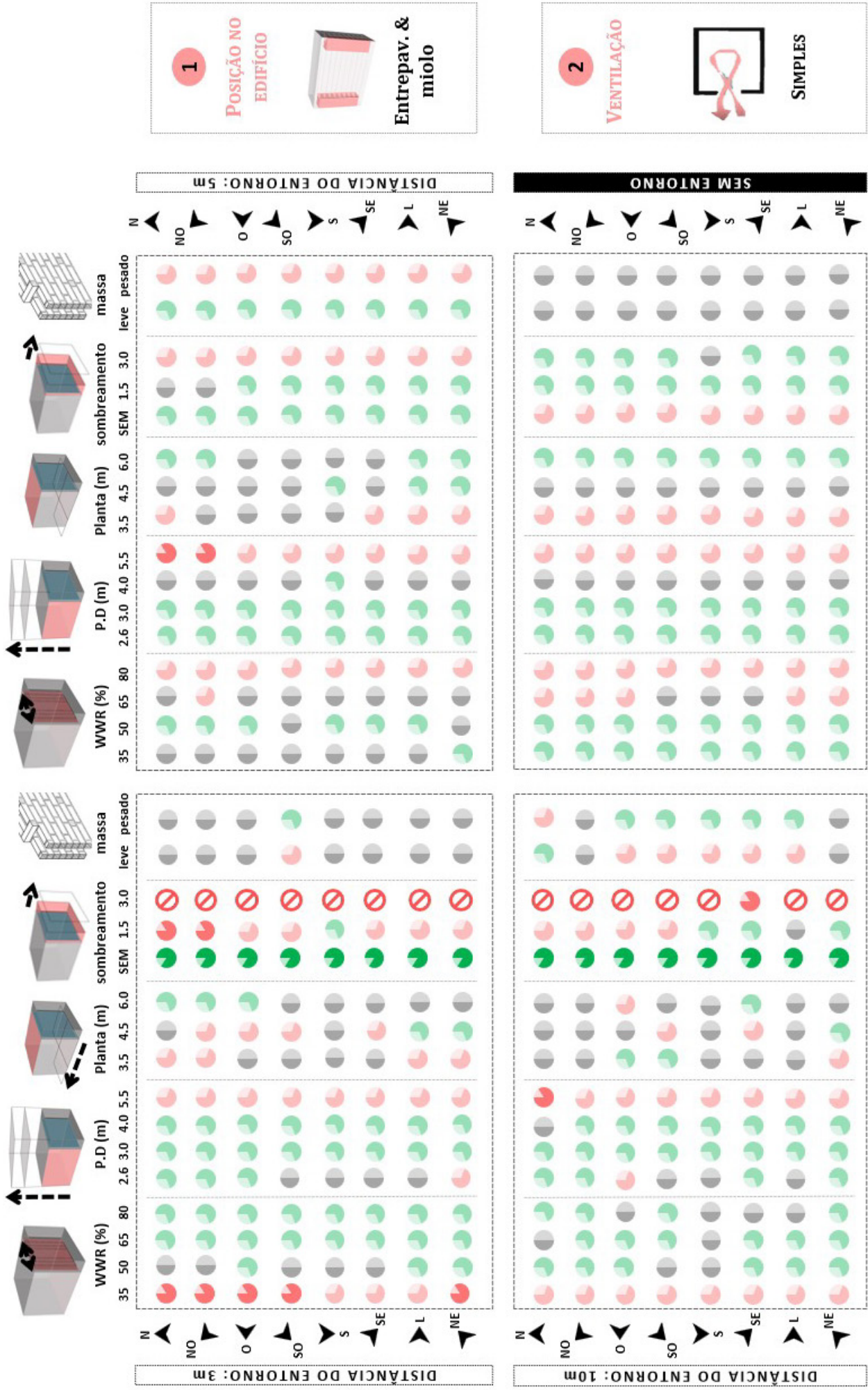
SIMPLES

CASO 3

UNIDADE LOCADA NO QUINA - ENTREPAVIMENTOS

&

COM VENTILAÇÃO SIMPLES

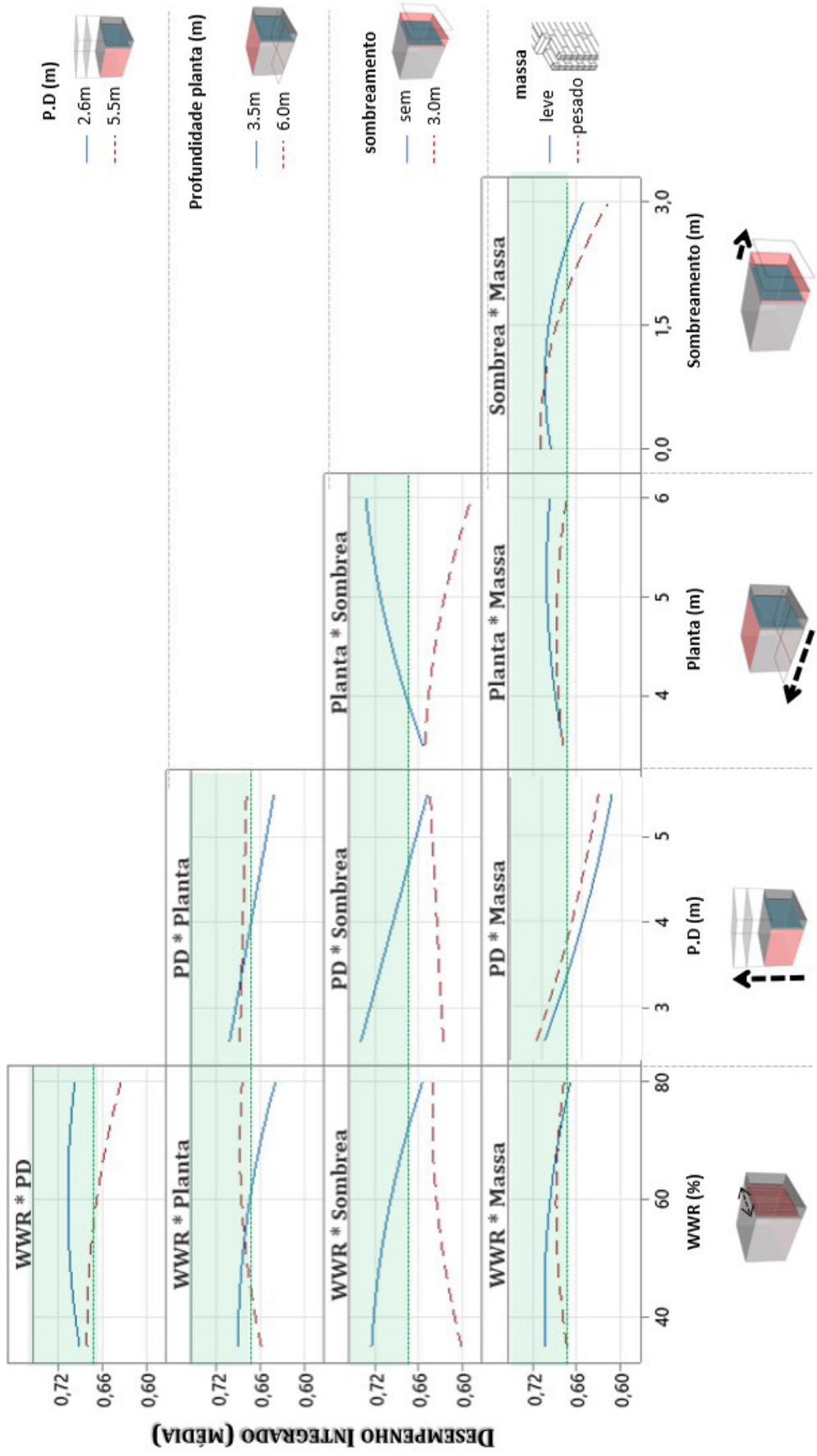


Grau de relevância de cada solução dentro os cenários que apresentaram desempenho integrado acima de 0.67

Descreve como o desempenho Integrado muda quando há alterações de duas variáveis.

Desempenho Integrado > 0.67

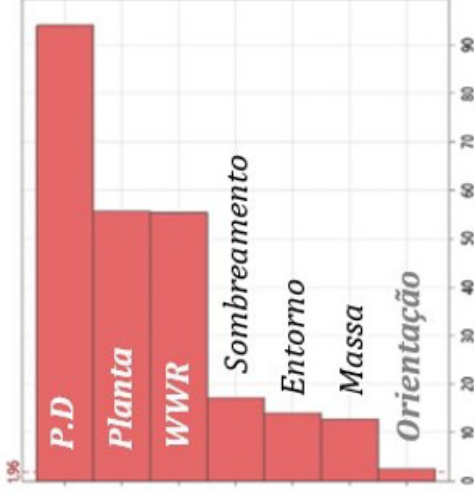
IMPACTO DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS



MELHORES SOLUÇÕES PARA CADA ENTORNO

Face	WWR	P.D	Planta	Somb.	Massa	Térmica HC	Luz UDI	D.I Desempenho Integrado
ENTORNO								
3M								
S	50%	2.6m	6.0m	sem	pesado	72%	98%	80.1%
SE	50%	2.6m	6.0m	sem	pesado	72%	98%	79.9%
S	50%	2.6m	6.0m	Sem	leve	72%	96%	79.7%
5M								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	78%	99%	84.3%
N	35%	2.6m	6.0m	1.5m	leve	78%	98%	83.7%
L	35%	2.6m	6.0m	1.5m	leve	78%	98%	83.4%
10M								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	76%	98%	82.8%
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	76%	98%	82.4%
SE	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	75%	98%	82.0%
SEM								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	78%	100%	84.6%
S	35%	2.6m	6.0m	1.5m	pesado	78%	100%	84.5%
N	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	78%	98%	83.7%

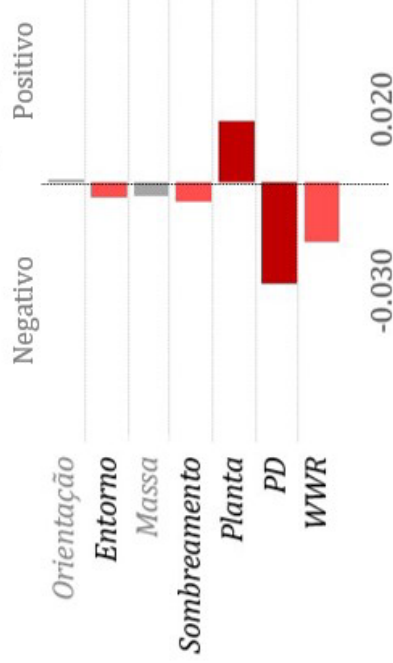
IMPACTO DAS SOLUÇÕES NO D.I



1
POSIÇÃO NO EDIFÍCIO

Entrepav. & miolo

IMPACTO (SRRC)



2
VENTILAÇÃO

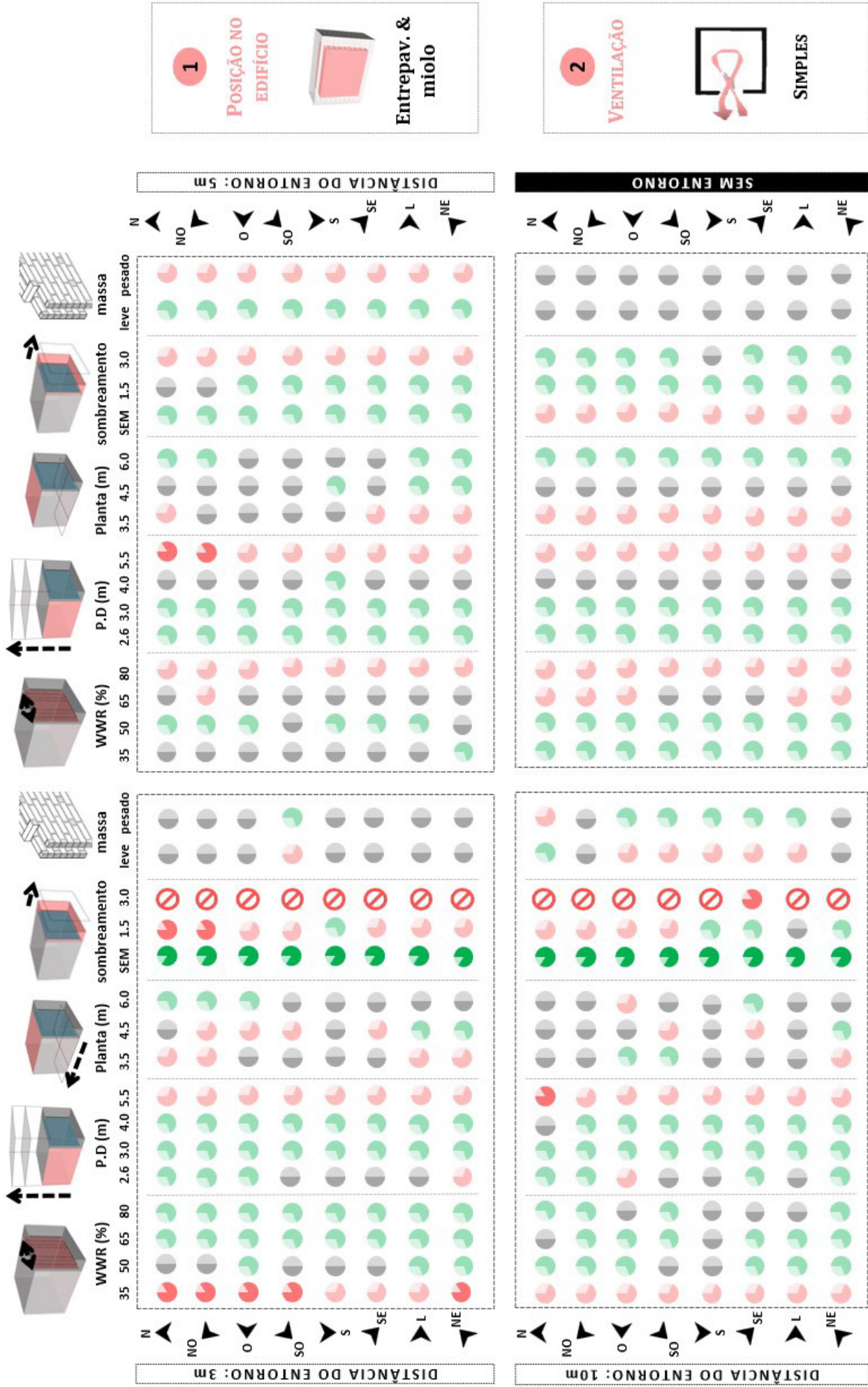
SIMPLES

CASO 4

UNIDADE LOCADA NO MIOLO - ENTREPAVIMENTOS

&

COM VENTILAÇÃO SIMPLES

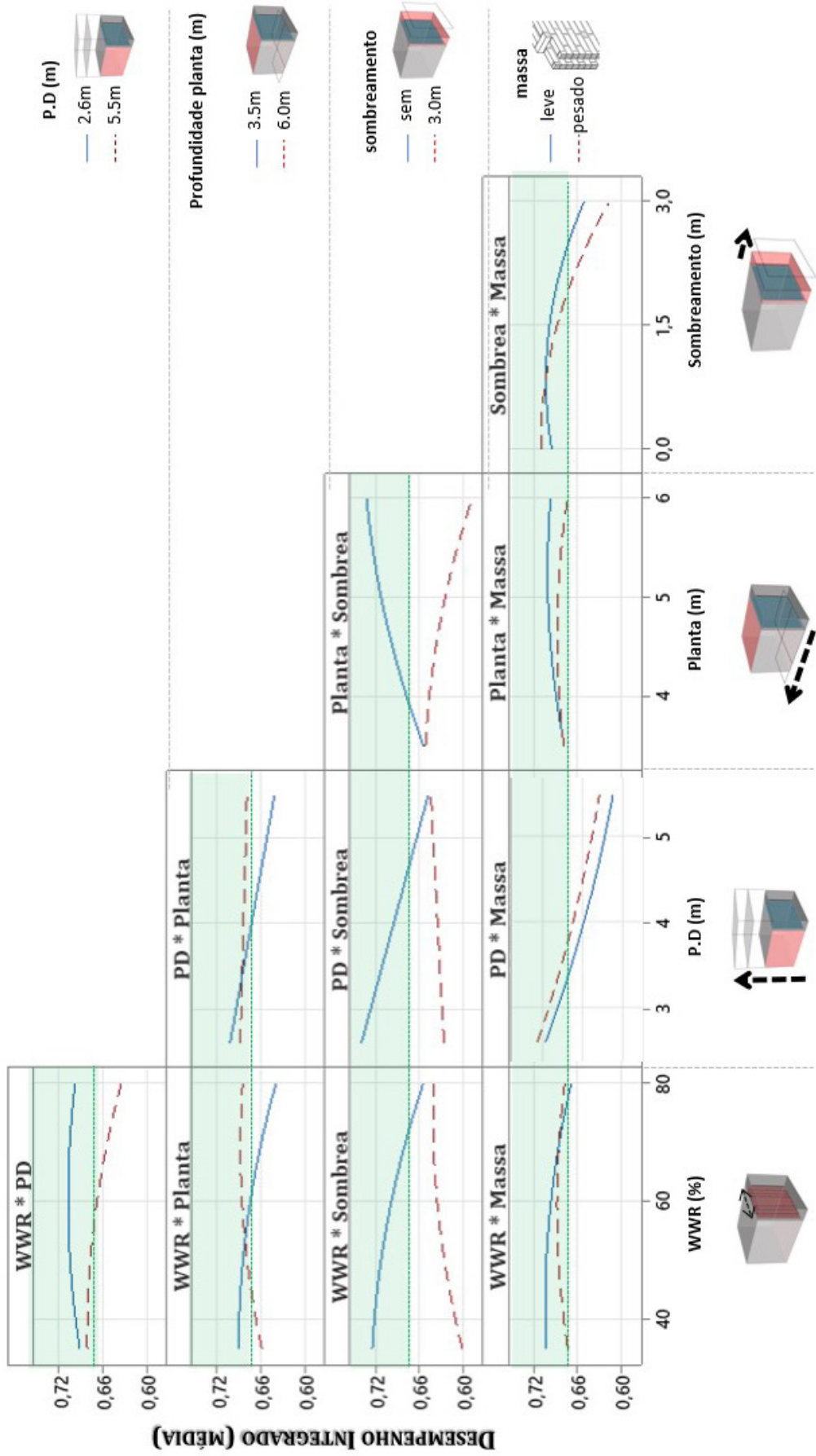


Grau de relevância de cada solução dentro os cenários que apresentaram desempenho integrado acima de 0.67

Descreve como o desempenho Integrado muda quando há alterações de duas variáveis.

Desempenho Integrado > 0.67

IMPACTO DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS



1

POSIÇÃO NO EDIFÍCIO

Entrepav. & miolo

2

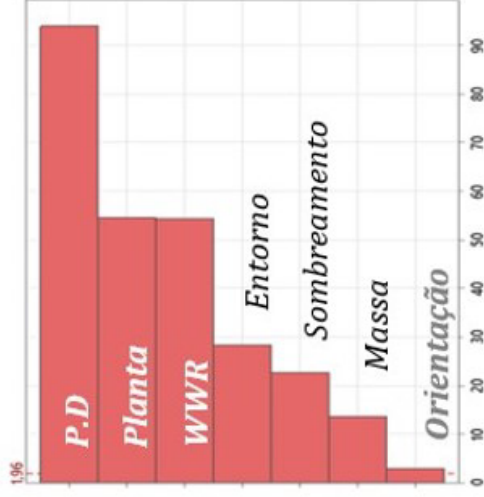
VENTILAÇÃO

SIMPLES

MELHORES SOLUÇÕES PARA CADA ENTORNO

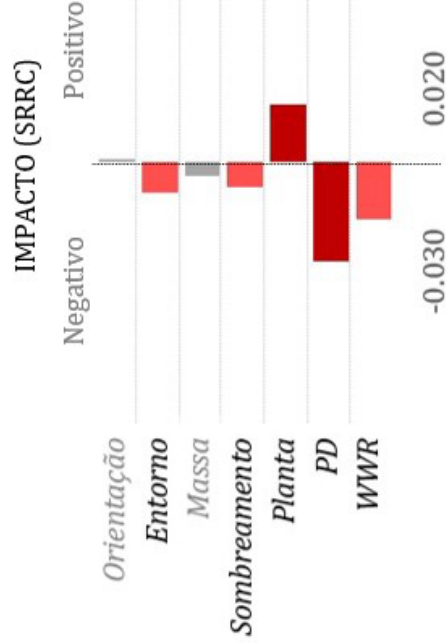
	Face	WWR	P.D	Planta	Somb.	Massa	Térmica HC	Luz UDI	D.I Desempenho Integrado
3M	S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.3%
	S	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	70%	97%	77.9%
	L	35%	2.6m	6.0m	Sem	leve	69%	96%	77.3%
5M	S	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	70%	97%	78.2%
	SE	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	71%	96%	78.1%
	L	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	69%	98%	78%
10M	N	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.4%
	S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.3%
	L	35%	2.6m	6.0m	sem	leve	70%	98%	78.2%
SEM	N	35%	2.6m	6.0m	1.5m	pesado	71%	98%	79.1%
	N	35%	2.6m	6.0m	1.5m	leve	71%	98%	78.8%
	S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	99%	78.7%

IMPACTO DAS SOLUÇÕES NO D.I



1
POSIÇÃO NO EDIFÍCIO

Entrepav. & miolo



2
VENTILAÇÃO

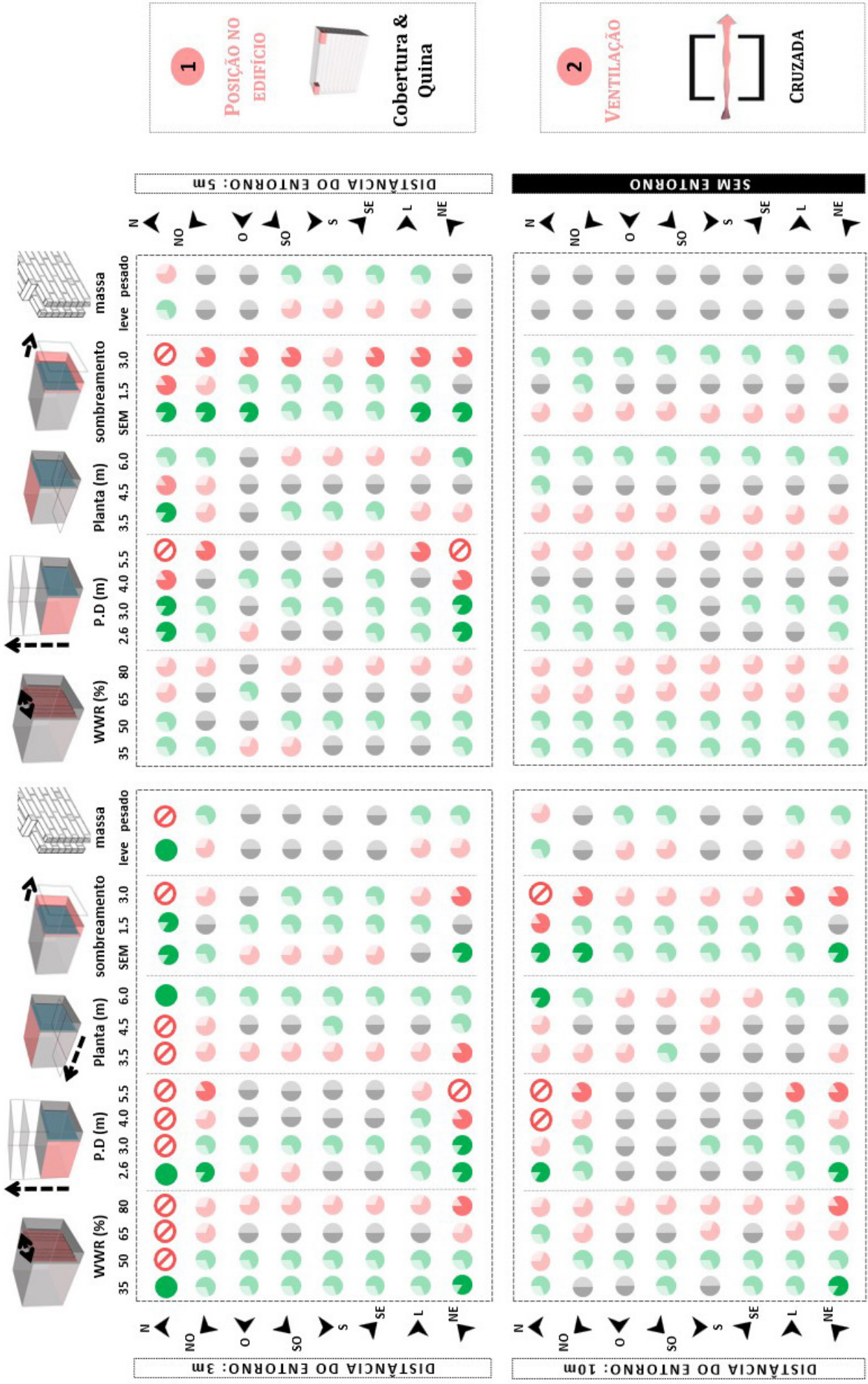
SIMPLES

CASO 5

UNIDADE LOCADA NA QUINA DA COBERTURA

&

COM VENTILAÇÃO CRUZADA

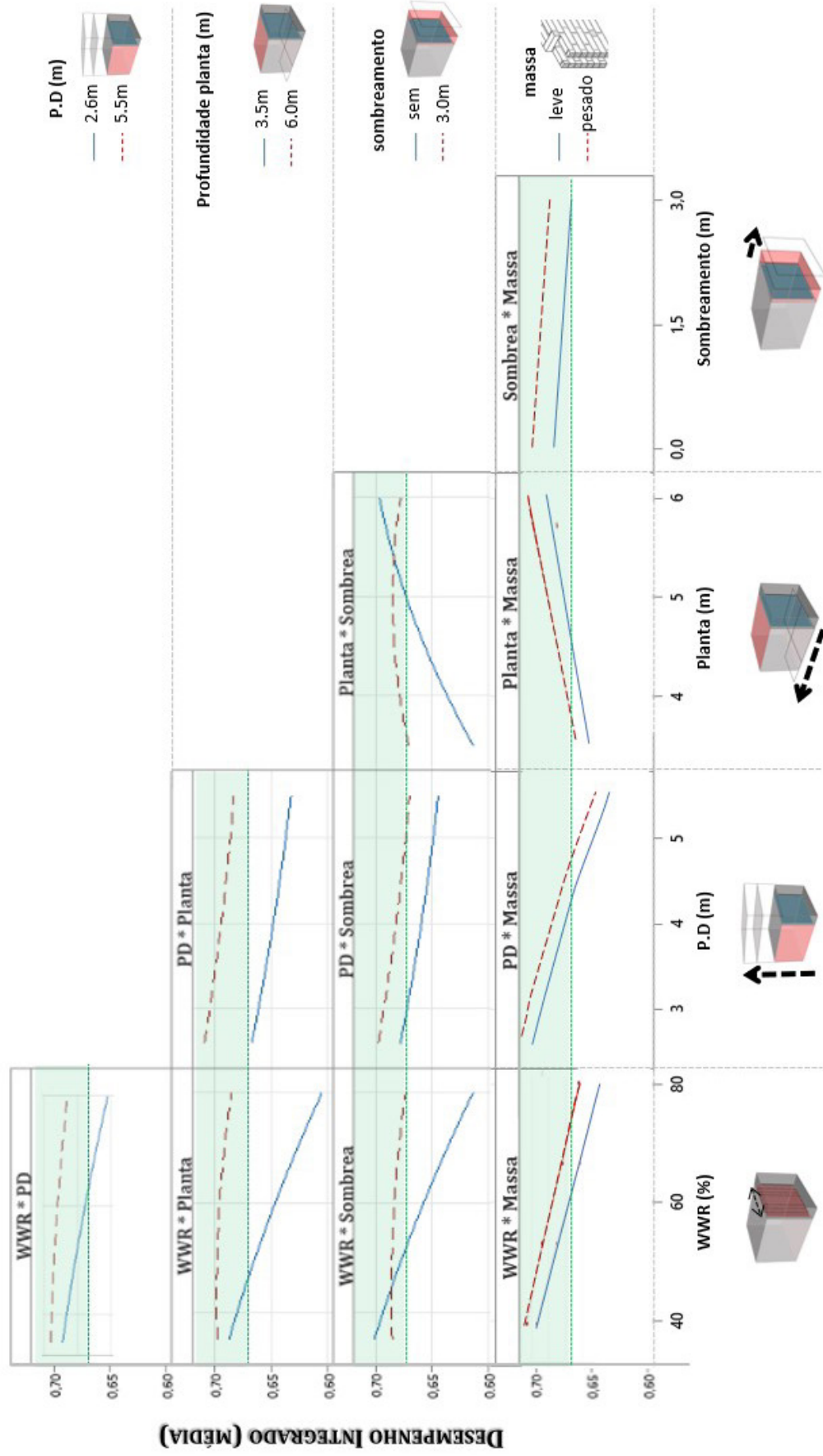


Grau de relevância de cada solução dentro os cenários que apresentaram desempenho integrado acima de 0.67

Descreve como o desempenho Integrado muda quando há alterações de duas variáveis.

Desempenho Integrado > 0.67

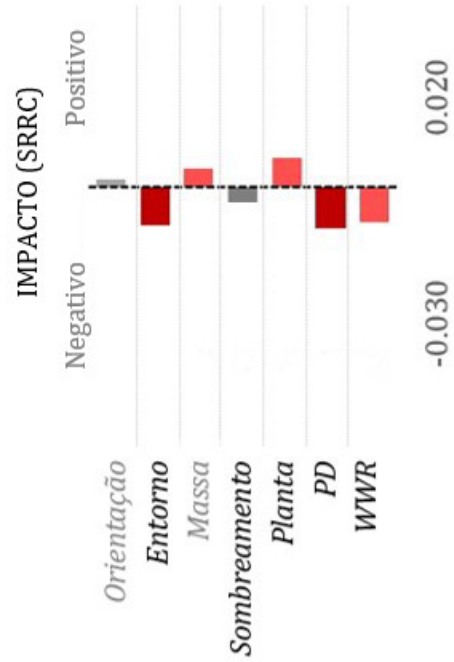
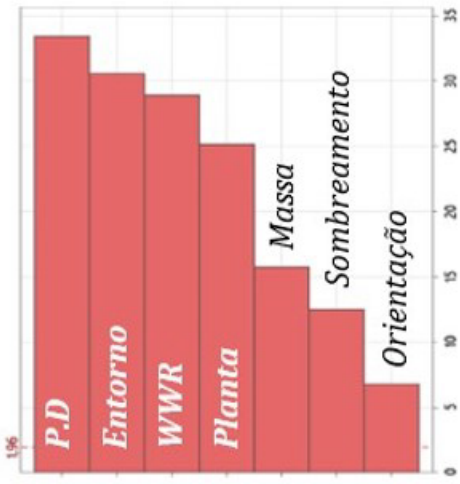
IMPACTO DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS



MELHORES SOLUÇÕES PARA CADA ENTORNO

	Face	WWR	P.D	Planta	Somb.	Massa	Térmica HC	Luz UDI	D.I Desempenho Integrado
3M	SE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	96%	76.4%
	S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	67%	98%	76.4%
	S	35%	3.0m	6.0m	Sem	pesado	67%	98%	76.0%
5M	SE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	96%	76.5%
	S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	98%	76.5%
	S	35%	3.0m	6.0m	Sem	pesado	67%	98%	76.0%
10M	SE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	97%	76.7%
	S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	67%	98%	76.6%
	SE	35%	3.0m	6.0m	Sem	pesado	67%	97%	76.0%
SEM	S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	99%	77.2%
	SE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	97%	77%
	N	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	97%	76.8%

IMPACTO DAS SOLUÇÕES NO D.I



1
POSIÇÃO NO EDIFÍCIO

Cobertura & Quina

2
VENTILAÇÃO

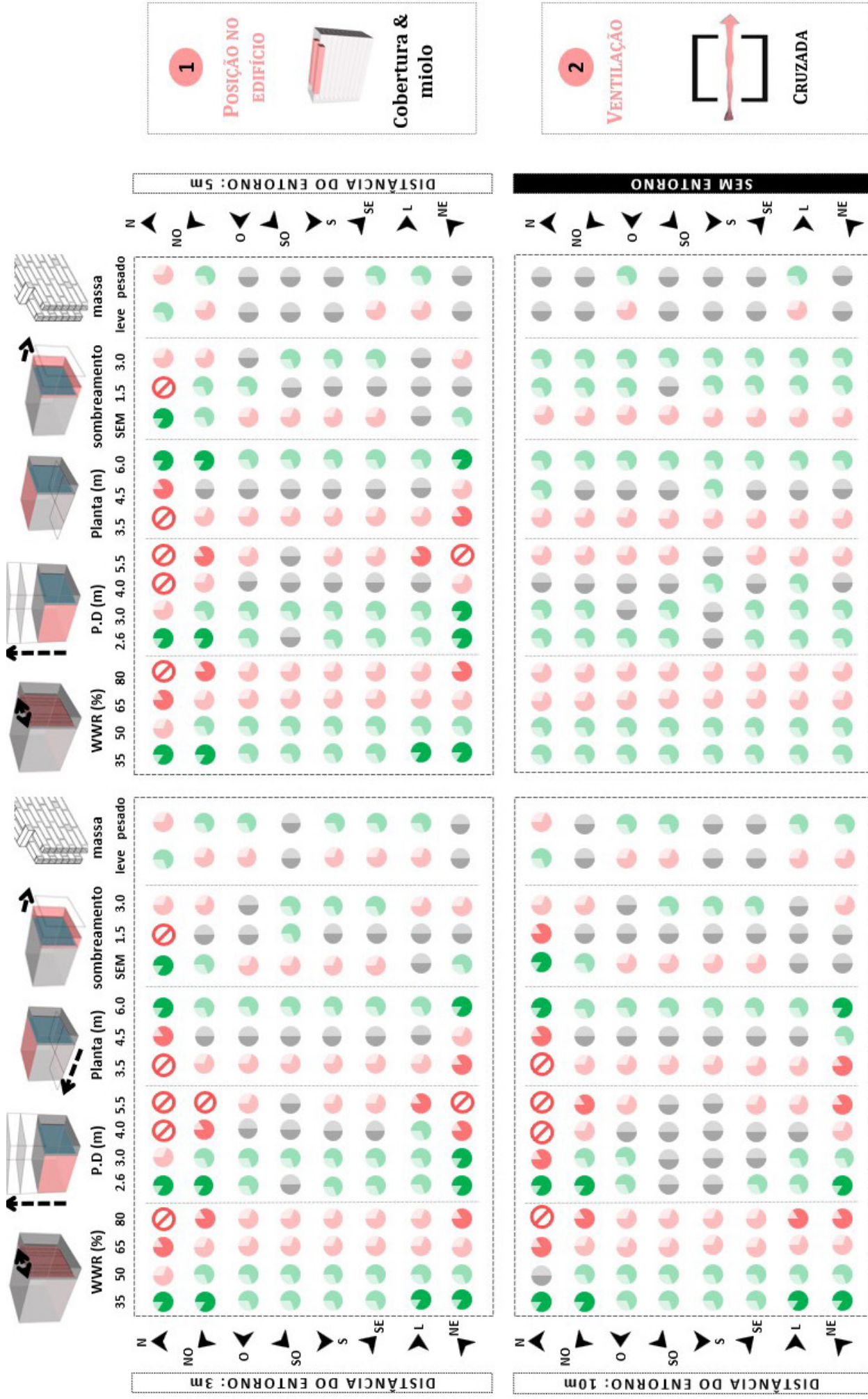
CRUZADA

CASO 6

UNIDADE LOCADA NO MIOLO- COBERTURA

&

COM VENTILAÇÃO CRUZADA

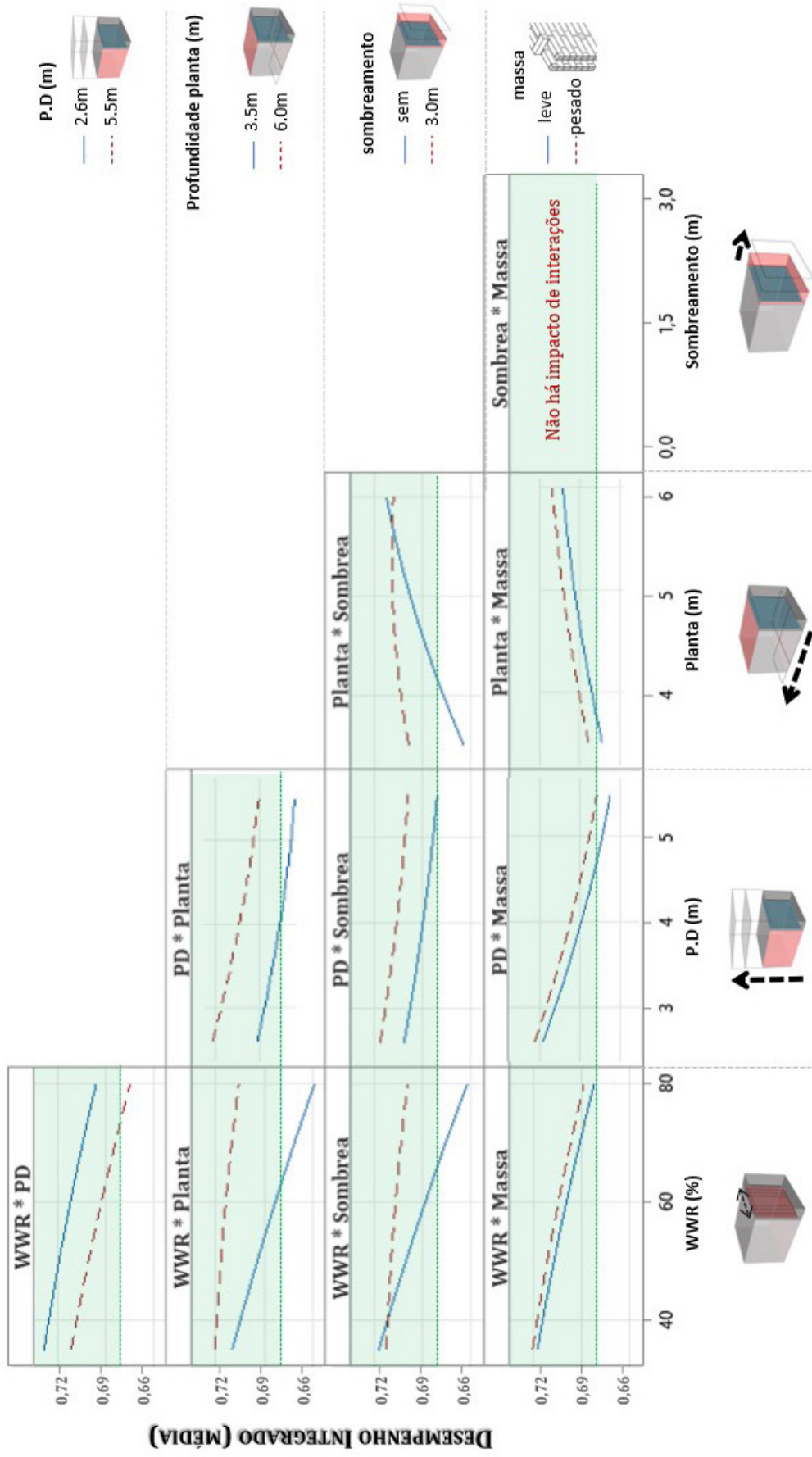


Grau de relevância de cada solução dentro os cenários que apresentaram desempenho integrado acima de 0.67

Descreve como o desempenho Integrado muda quando há alterações de duas variáveis.

Desempenho Integrado > 0.67

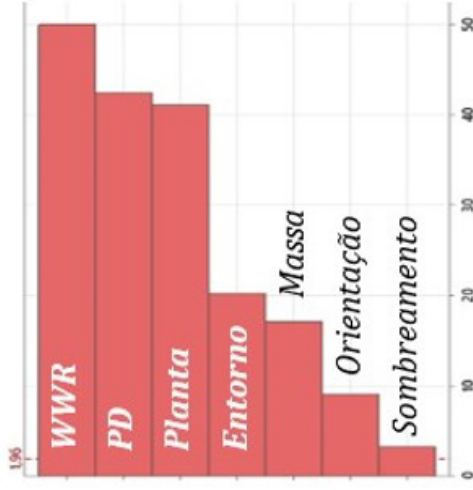
IMPACTO DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS



MELHORES SOLUÇÕES PARA CADA ENTORNO

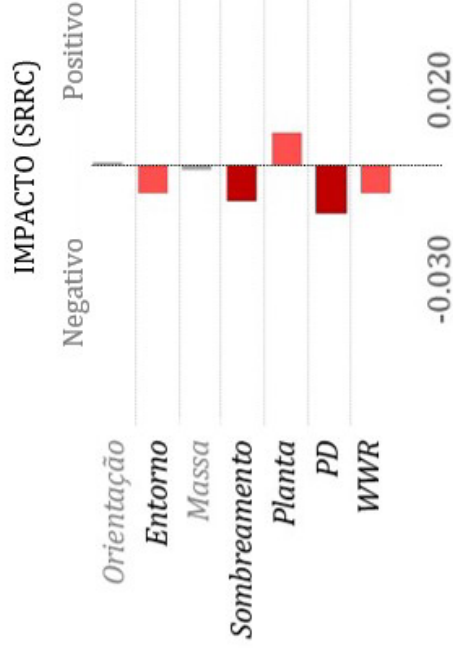
Face	WWR	P.D	Planta	Somb.	Massa	Térmica HC	Luz UDI	D.I Desempenho Integrado
ENTORNO 3M								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	64%	98%	74.1%
SE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	63%	98%	73.5%
S	35%	3.0m	6.0m	Sem	pesado	63%	98%	73.5%
ENTORNO 5M								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	64%	98%	74.2%
SE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	63%	98%	73.6%
S	35%	3.0m	6.0m	Sem	pesado	63%	98%	73.5%
ENTORNO 10M								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	64%	98%	74.1%
SE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	64%	98%	74.1%
S	35%	3.0m	6.0m	Sem	pesado	63%	98%	73.5%
ENTORNO SEM								
N	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	67%	99%	76.4%
L	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	66%	99%	76.1%
L	35%	3.0m	6.0m	sem	pesado	66%	99%	76%

IMPACTO DAS SOLUÇÕES NO D.I



1
POSIÇÃO NO EDIFÍCIO

Cobertura & miolo



2
VENTILAÇÃO

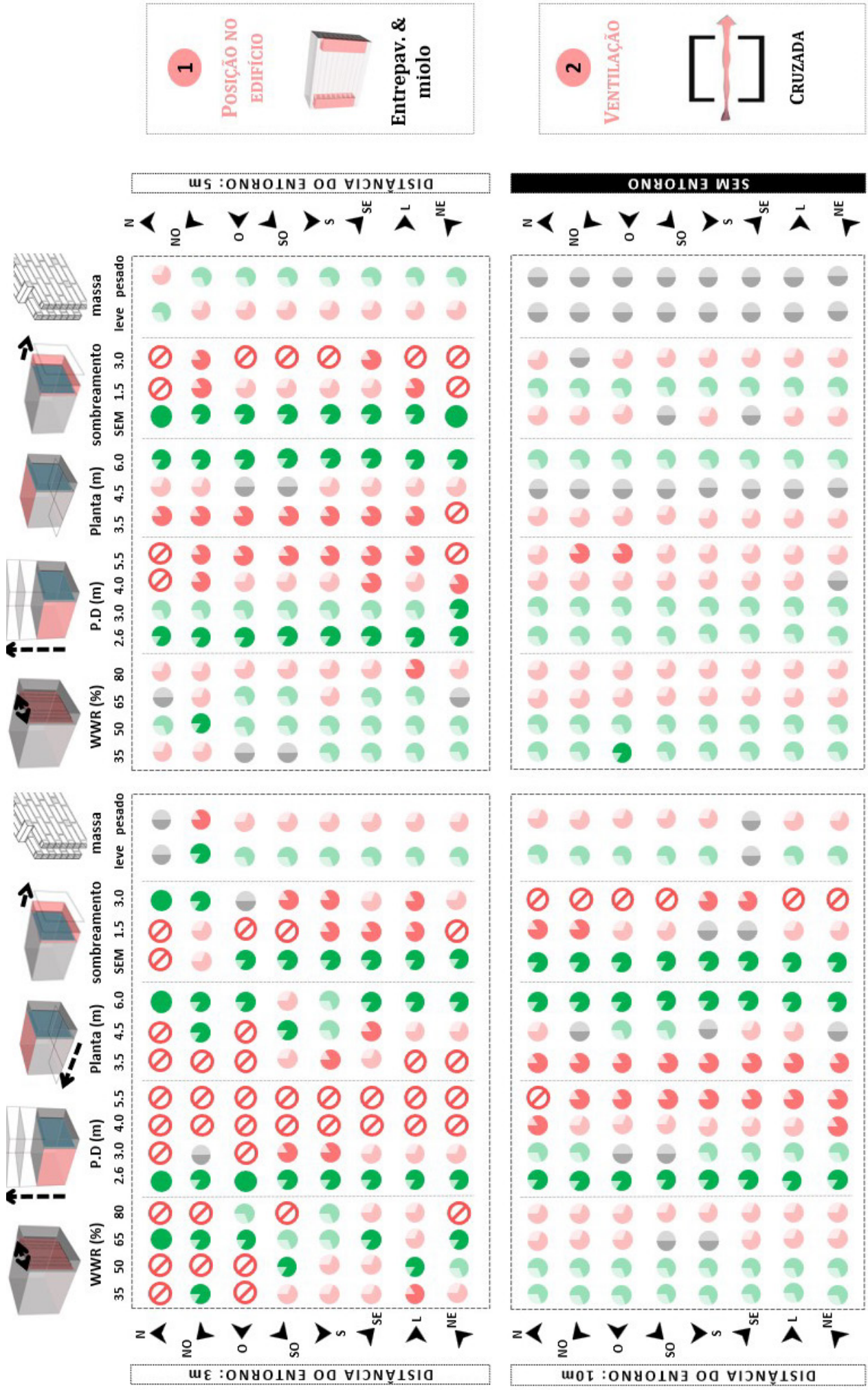
CRUZADA

CASO 7

UNIDADE LOCADA NO QUINA - ENTREPAVIMENTOS

&

COM VENTILAÇÃO CRUZADA

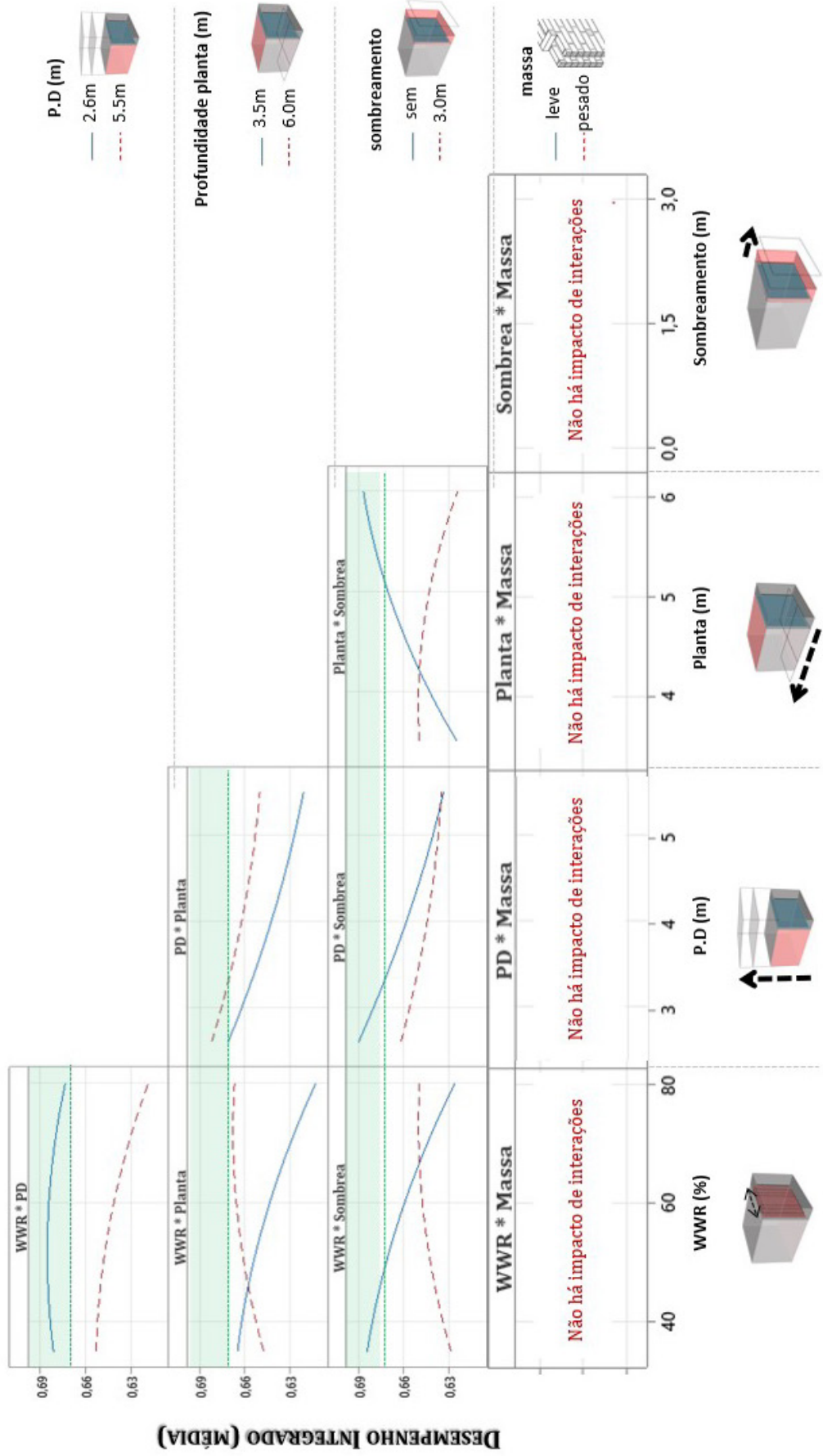


Grau de relevância de cada solução dentro os cenários que apresentaram desempenho integrado acima de 0.67

Descreve como o desempenho Integrado muda quando há alterações de duas variáveis.

Desempenho
Integrado > 0.67

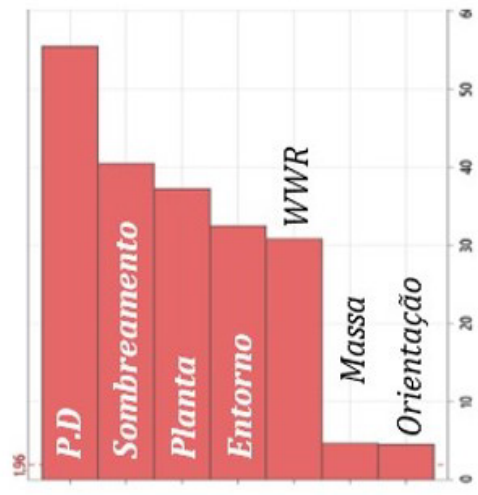
IMPACTO DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS



MELHORES SOLUÇÕES PARA CADA ENTORNO

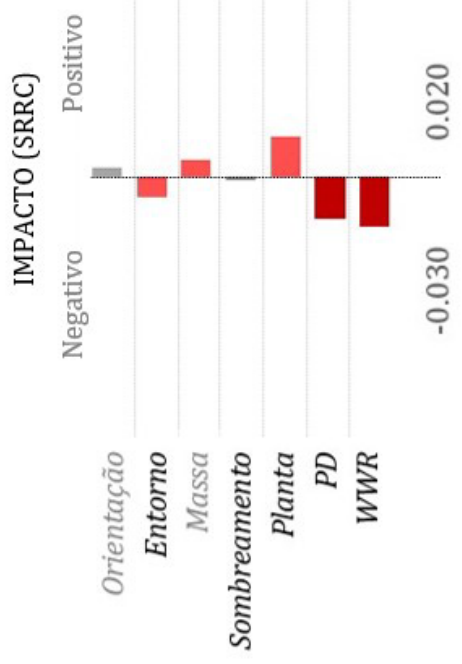
Face	WWR	P.D	Planta	Somb.	Massa	Térmica HC	Luz UDI	D.I Desempenho Integrado
ENTORNO								
3M								
E	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	97%	76.5%
SE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	67%	98%	76.4%
E	35%	3.0m	6.0m	Sem	pesado	67%	98%	76.3%
5M								
S	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.5%
E	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	70%	98%	78.2%
SE	50%	2.6m	6.0m	Sem	pesado	69%	98%	77.7%
10M								
E	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	72%	93%	78.2%
SE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	71%	92%	78.2%
SE	50%	2.6m	6.0m	Sem	pesado	71%	92%	78.1%
SEM								
N	35%	2.6m	6.0m	1.5m	pesado	75%	98%	81.5%
NE	35%	2.6m	6.0m	1.5m	pesado	74%	98%	81.4%
N	35%	2.6m	6.0m	1.5m	leve	74%	98%	81.4%

IMPACTO DAS SOLUÇÕES NO D.I



1
POSIÇÃO NO EDIFÍCIO

Entrepav. & miolo



2
VENTILAÇÃO

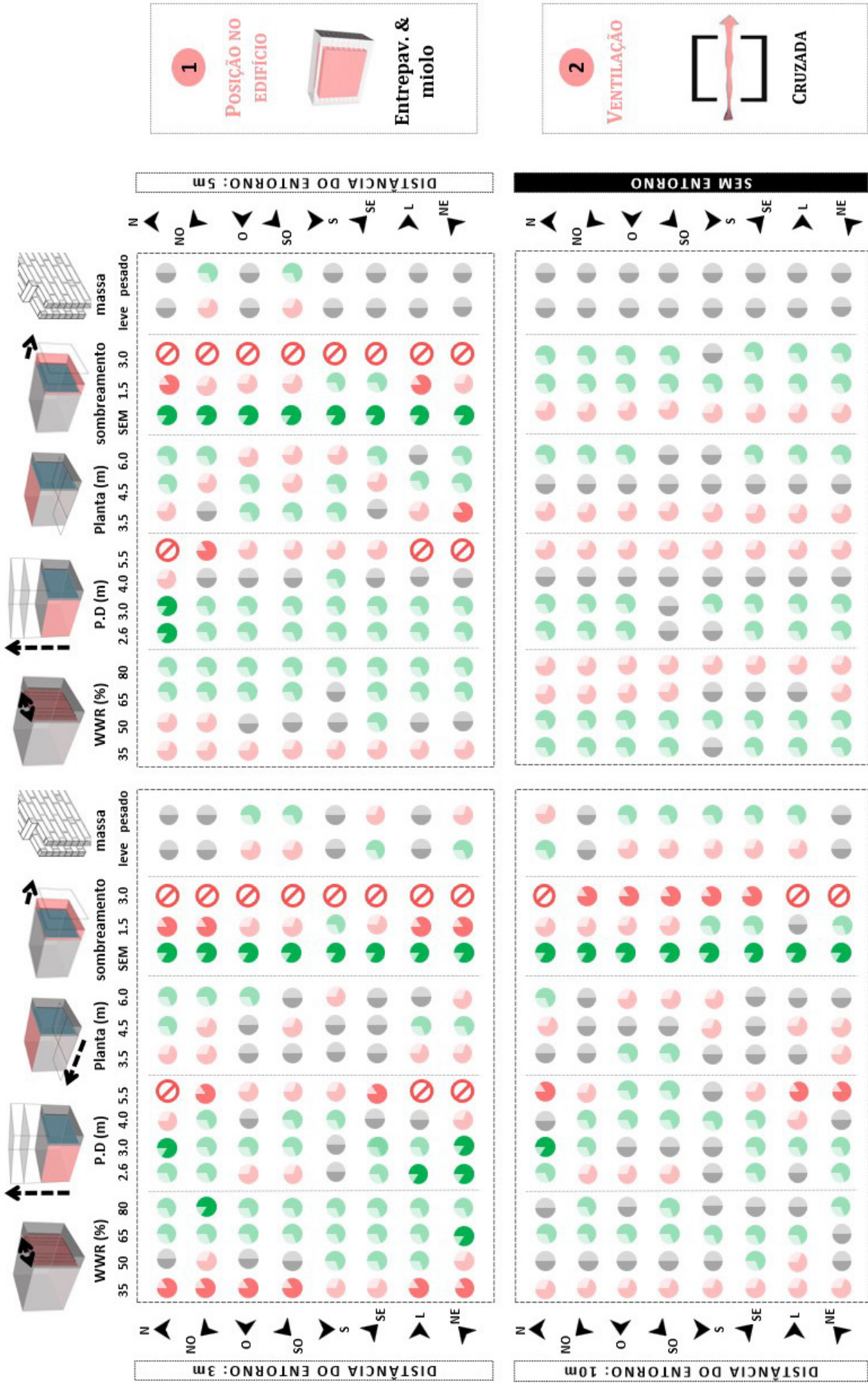
CRUZADA

CASO 8

UNIDADE LOCADA NO MIOLO- ENTREPAVIMENTOS

&

COM VENTILAÇÃO CRUZADA

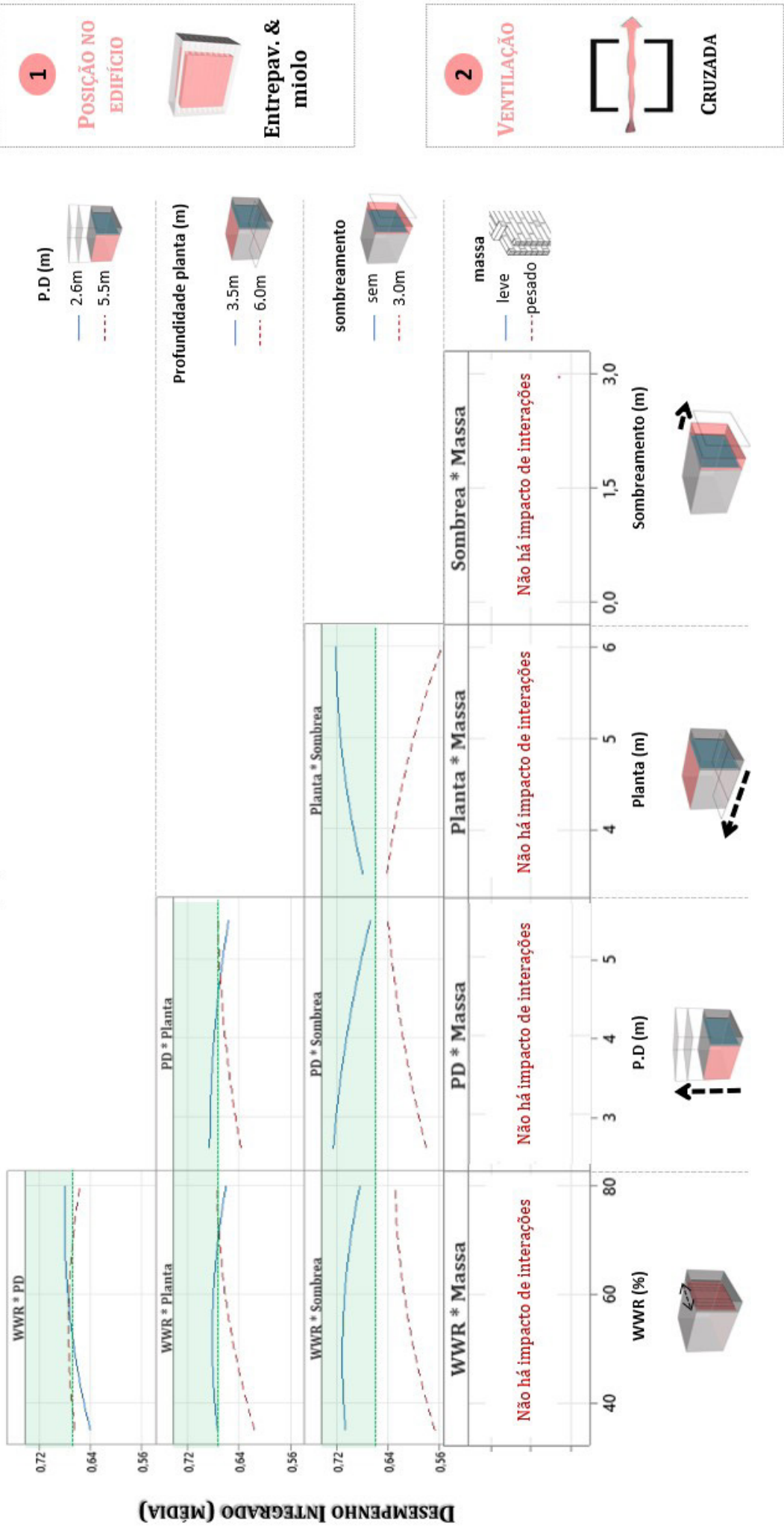


Grau de relevância de cada solução dentro os cenários que apresentaram desempenho integrado acima de 0.67

Descreve como o desempenho Integrado muda quando há alterações de duas variáveis.

Desempenho Integrado > 0.67

IMPACTO DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS



MELHORES SOLUÇÕES PARA CADA ENTORNO

Face	WWR	P.D	Planta	Somb.	Massa	Térmica HC	Luz UDI	D.I Desempenho Integrado
3M								
NE	65%	2.6m	6.0m	sem	pesado	61%	91%	70,1%
O	50%	2.6m	6.0m	sem	pesado	60%	92%	69,9%
NE	65%	3.0m	6.0m	Sem	pesado	60%	92%	69,9%
5M								
SO	50%	2.6m	6.0m	sem	pesado	63%	98%	72.6%
E	35%	3.0m	6.0m	sem	pesado	63%	93%	72%
SE	35%	3.0m	6.0m	Sem	pesado	62%	92%	71.9%
10M								
N	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	65%	95%	74.1%
N	35%	3.0m	6.0m	sem	pesado	64%	96%	73.3%
S	35%	3.0m	6.0m	Sem	pesado	64%	95%	73.2%
SEM								
N	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	98%	76.8%
NE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	96%	76.5%
SE	35%	2.6m	6.0m	sem	pesado	68%	96%	76.5%

IMPACTO DAS SOLUÇÕES NO D.I

