



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO E DESIGN (DAUD)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO E
DESIGN

INDICADORES DE PERFORMANCE PARA ANÁLISE DE
ARQUITETURAS DE MEDICINA DIAGNÓSTICA

Leonardo Luna De Melo Jorge

Fortaleza - CE
2023

LEONARDO LUNA DE MELO JORGE

**INDICADORES DE PERFORMANCE PARA ANÁLISE DE
ARQUITETURAS DE MEDICINA DIAGNÓSTICA**

Dissertação de mestrado apresentada ao
PPG AU+D em Modelagem e Design da
Informação da Universidade Federal do
Ceará.

Área de concentração: Produção do Espaço
Urbano e Arquitetônico.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Ribeiro Cardoso

Coorientadora: Profa. Dra. Mariana Monteiro Xavier de Lima

Fortaleza - CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- J71i Jorge, Leonardo Luna de Melo.
 INDICADORES DE PERFORMANCE PARA ANÁLISE DE ARQUITETURAS DE
 MEDICINA DIAGNÓSTICA / Leonardo Luna de Melo Jorge. – 2023.
 122 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
 Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Design, Fortaleza, 2023.
 Orientação: Prof. Dr. Daniel Ribeiro Cardoso.
 Coorientação: Profa. Dra. Mariana Monteiro Xavier de Lima.
1. design computacional. 2. performance. 3. BIM. 4. análise. 5. edificações de saúde. I.
 Título.

CDD 720

LEONARDO LUNA DE MELO JORGE

INDICADORES DE PERFORMANCE PARA ANÁLISE DE ARQUITETURAS DE
MEDICINA DIAGNÓSTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Design da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.
Área de concentração: Produção do Espaço Urbano e Arquitetônico.

Aprovada em: __/__/__.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Ribeiro Cardoso (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Mariana Monteiro Xavier de Lima (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Neliza Maria e Silva Romcy
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Nuno Beirão
Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa (FAUL)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado de esforço, só capaz de ser dedicado devido a imensa sorte trazida por pessoas que quero bem. Devo tudo ao suporte da minha companheira, da minha família e dos meus amigos. Sem os momentos compartilhados, nada seria possível.

Agradeço aos meus orientadores, Daniel e Mariana, por darem direção ao trabalho com atenção e visão. Suas contribuições são fundamentais na construção da minha caminhada acadêmica. Também agradeço ao LED, pelo espaço criativo que incentiva a inovação.

O presente projeto foi desenvolvido com apoio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) através da concessão de bolsa de estudo de Mestrado.

“na representação da forma e na
comparação de formas afins, vemos, num
caso, um diagrama de forças em equilíbrio”
(Thompson, 1917)

RESUMO

A avaliação de performance em edificações de equipamentos de saúde é campo teórico e prático com papel fundamental para o bom planejamento de arquiteturas eficientes e capazes de contribuir para tratamentos e diagnósticos. Nesse contexto, insere-se a questão de pesquisa de como o uso de modelos computacionais podem contribuir para a avaliação de qualidade de edifícios de saúde e auxiliar a tomada de decisão? Parte-se da problemática da dificuldade do processo de decisão em design, em que a baixa disponibilidade de modelos de análise com múltiplos critérios voltados para edificações da saúde tem comprometido a tomada de decisão com a melhor performance e assertividade. Frente a isso, a presente pesquisa desenvolveu um dispositivo para avaliação de indicadores capaz de aferir a qualidade de edificações da saúde. Por meio de indicadores retirados da literatura, o artefato mensura e avalia quantitativamente aspectos performáticos relevantes para os edifícios da tipologia de edificações de medicina diagnóstica. Os indicadores selecionados tratam de três temáticas: a adequabilidade dos edifícios a normativas que regem as boas práticas de equipamentos de saúde; a configuração espacial da planta por meio de ferramentas da Space Syntax; e qualidades ambientais internas. Os indicadores estão implementados como protótipo computacional em sistema Building Information Modeling (BIM) através de uma interface de programação visual. A metodologia escolhida para desenvolver a pesquisa é a Design Science Research, coerente com o objetivo da pesquisa. A conclusão do trabalho reflete sobre a implementação e validação do modelo a partir de análise de edifícios selecionados para pesquisa. Por fim, o trabalho contribui para a teoria e prática de modelos computacionais de avaliação em arquitetura, e disponibiliza *framework* para implementação pelos pares.

palavras chave: design computacional, performance, BIM, análise, edificações de saúde.

ABSTRACT

Performance evaluation in health equipment buildings is a theoretical and practical field that plays a fundamental role in the proper planning of efficient architectures capable of contributing to treatments and diagnoses. In this context, the research question arises: how can the use of computational models contribute to evaluating the quality of healthcare buildings and aid decision-making? The research problem focuses on the difficulty of the design decision-making process, in which the low availability of multi-criteria analysis models for healthcare buildings has compromised decision-making with the best performance and assertiveness. In light of this, this research has developed a device for evaluating indicators capable of evaluating the quality of healthcare buildings. Using indicators taken from the literature, the artifact quantitatively measures and evaluates relevant performance aspects for buildings of the diagnostic medicine building typology. The indicators selected cover three themes: the suitability of buildings to the regulations governing good practice in healthcare equipment; the spatial configuration of the floor plan using Space Syntax tools; and internal environmental qualities. The indicators have been implemented as a computer prototype in the Building Information Modeling (BIM) system through a visual programming interface. The methodology chosen to develop the research is Design Science Research, which is consistent with the objective of the research. The conclusion of the work discusses the implementation and validation of the model based on the analysis of buildings selected for research. Finally, the work contributes to the theory and practice of computational models for architectural evaluation, and provides a framework for implementation by peers.

key words: computational design, performance, BIM, analysis, healthcare buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama com estrutura do trabalho, listando capítulos	.....	p.25
Figura 2	Diagrama com etapas metodológicas	.....	p.26
Figura 3	Diagrama síntese de revisão de literatura, mencionando constructos, modelos, métodos e instâncias que são base para o trabalho	.....	p.40
Figura 4	Gráfico com classificação temática, resultado de revisão de literatura	.....	p.42
Figura 5	Etapas do processo de design	.....	p.47
Figura 6	Diagrama com estrutura computacional proposta	.....	p.49
Figura 7	Diagrama representando inputs e outputs dos dois tipos de módulos: IQ e EM	.....	p.51
Figura 8	Diagrama representando as Toolboxes temáticas, compostas por IQ e EM	.....	p.52
Figura 9	Diagrama representando uma Toolbox sistematizada por LOD	.....	p.53
Figura 10	Workflow do framework	.....	p.54
Figura 11	Diagrama do espaço de opções de design, exemplificado com dois indicadores (eixos X e Y).	.....	p.57
Figura 12	Gráficos ilustrando a tomada de decisão multicritério	.....	p.60
Figura 13	Workflow detalhado do framework	.....	p.63
Figura 14	Workflow de projeto em diferentes LOD	.....	p.64

Figura 15	Workflow do framework, representando interfaces e ferramentas computacionais, além das visualizações de resultados	.....	p.65
Figura 16	Modelagem necessária para a medição dos indicadores da sintaxe espacial	.....	p.71
Figura 17	Fatores do ambiente interno mapeados na literatura	.....	p.73
Figura 18	Modelagem necessária para a medição dos indicadores IEQ	.....	p.77
Figura 19	Exemplar do programa arquitetônico utilizado para implementação do sistema.	.....	p.81
Figura 20	Algoritmo em Grasshopper, com diagrama cromático representando o fluxo do framework no eixo X e os diferentes indicadores no eixo Y	.....	p.82
Figura 21	Dashboard da interface, com diferentes gráficos visuais customizáveis	.....	p.84
Figura 22	Dispositivos presentes no algoritmo responsáveis pela customização da visualização dos resultados da avaliação.	.....	p.85
Figura 23	Gráfico para verificação dos indicadores de sintaxe espacial	.....	p.90
Figura 24	Gráfico de avaliação melhorado após feedback de validação	.....	p.93
Figura 25	Diagrama ilustrando o processo de projeto de base ampla, que inclui diferentes eixos de sustentabilidade	.....	p.95
Figura 26	Esquema que ilustra a emergência do aprendizado a partir dos ciclos de feedback	.....	p.97
Figura 27	Possível estrutura computacional com geração e otimização automatizada	.....	p.100
Figura 28	Estrutura geral do algoritmo, dividida em 12 recortes	.....	p.105
Figura 29	Algoritmo ampliado	.....	p.106

Figura 30	Recorte 1 do algoritmo, responsável pela importação de dados BIM de zonas, e inserção de dados do programa arquitetônico: as relações topológicas	.....	p.107
Figura 31	Recorte 2 do algoritmo, responsável pela modelagem ambiental para simulação	.....	p.107
Figura 32	Recorte 3 do algoritmo, responsável pela medição dos indicadores da sintaxe espacial utilizando o pacote Syntactic	.....	p.108
Figura 33	Recorte 4 do algoritmo, responsável pela medição dos indicadores normativos utilizando componentes do Grasshopper	.....	p.109
Figura 34	Recorte 5 do algoritmo, responsável pela medição dos indicadores IEQ utilizando componentes dos plugins Ladybug e Honeybee para Grasshopper	.....	p.110
Figura 35	Recorte 6 do algoritmo, responsável pela avaliação dos indicadores da sintaxe espacial, comparando os valores medidos com os valores de referência	.....	p.111
Figura 36	Recorte 7 do algoritmo, responsável pela avaliação dos indicadores normativos, comparando os valores medidos com os valores de referência	.....	p.112
Figura 37	Recorte 8 do algoritmo, responsável pela avaliação dos indicadores IEQ medidos por meio de simulação ambiental, comparando os valores medidos com os valores de referência	.....	p.113
Figura 38	Recortes 9 e 10 do algoritmo, responsáveis pela visualização dos indicadores da sintaxe espacial e adequabilidade normativa, respectivamente	.....	p.114
Figura 39	Recorte 11 do algoritmo, responsável pela visualização do indicador de iluminação natural, disposto em planta	.....	p.114
Figura 40	Recorte 12 do algoritmo, responsável pela visualização de diversos indicadores de maneira simplificada	.....	p.115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Quadro com etapas>atividades>entregáveis.	.....	p. 26
Tabela 2	Delimitação conceitual da ferramenta a partir de revisão de literatura.	.....	p. 45
Tabela 3	Papéis dos usuários em cada interface computacional.	.....	p. 50
Tabela 4	Mapeamento de indicadores relevantes para a tipologia.	.....	p.68
Tabela 5	Mapeamento de indicadores da Space Syntax.	.....	p.70
Tabela 6	Mapeamento de indicadores IEQ.	.....	p.74
Tabela 7	Esquemas de peso para diferentes parâmetros IEQ.	.....	p. 76
Tabela 8	Mapeamento de indicadores normativos.	.....	p. 79
Tabela 9	Indicadores implementados na ferramenta.	.....	p.86
Tabela 10	Descrição da verificação dos cálculos.	.....	p. 88
Tabela 11	Resultados da verificação dos cálculos de consumo energético.	.....	p. 91
Tabela 12	Resultados do formulário de validação do sistema.	.....	p. 92
Tabela 13	Resultados do formulário de validação do sistema.	.....	p. 93
Tabela 14	Memorial de cálculo dos indicadores implementados na ferramenta.	.....	p. 116
Tabela 15	Tabela de referência para os indicadores implementados na ferramenta.	.....	p. 117

LISTA DE ABREVIACOES

BIM: Building Information Modeling
BPA: Building Performance Analysis
CAD: Computer Aided Design
CFD: Computer Fluid Dynamics
dB: Decibéis
DSR: Design Science Research
DSS: Decision Support System
EAS: Estabelecimento de Assist ncia em Saúde
EM: Evaluation Module
FEM: Finite Elements Model
IAQ: Indoor Air Quality
IEQ: Indoor Environmental Quality
IFC: Industry Foundation Class
IPV: Interface de Programaco Visual
IQ: Indicator Query Module
kWh: Quilowatt hora
kWh/m²: Quilowatt hora por metro quadrado
LOD: Level of Development
NBR: Norma Brasileira
RDC: Resolu o de Diretoria Colegiada
SS: Space Syntax
TB: Toolbox

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. JUSTIFICATIVA.....	16
1.2. ÁREAS DE ESTUDO.....	18
1.3. PERGUNTAS NORTEADORAS.....	20
1.4. PROBLEMA DE PESQUISA.....	20
1.5. HIPÓTESE.....	21
1.6. OBJETIVO.....	21
1.6.1 Geral.....	21
1.6.2 Objetivos Específicos.....	21
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2. METODOLOGIA.....	25
2.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	27
2.2 <i>DESIGN DO FRAMEWORK</i>	27
2.3 IMPLEMENTAÇÃO.....	28
2.4 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	30
2.4.1 Verificação.....	30
2.4.2. Validação.....	31
3. PERFORMANCE, COMPUTAÇÃO E ARQUITETURA.....	32
3.1. ONTOLOGIAS.....	32
3.2. COMPUTAÇÃO E PERFORMANCE.....	36
3.3. PROBLEMA CONCEITUAL: DELIMITAÇÃO DO ARTEFATO.....	40
4. DESIGN DO <i>FRAMEWORK</i>.....	46
4.1. O QUE É?.....	46
4.2. INTERFACE COMPUTACIONAL.....	47
4.3. USUÁRIOS E PAPÉIS.....	49
4.4. FERRAMENTAS.....	51
4.4.1. LOD.....	53
4.5. <i>WORKFLOW</i>	54

4.5.1 Modelagem.....	54
4.5.2. Medição.....	55
4.5.3. Avaliação.....	56
4.6. CONCLUSÃO - SÍNTESE DO <i>FRAMEWORK</i>	63
5. IMPLEMENTAÇÃO: MEDICINA DIAGNÓSTICA.....	67
5.1. CONFIGURAÇÃO ESPACIAL.....	69
5.2. IEQ.....	72
5.3. NORMAS E CÓDIGOS.....	78
6. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	81
6.1. INTERFACE DO MODELO.....	83
7. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	88
7.1. VERIFICAÇÃO.....	88
7.1.1 Configuração Espacial.....	89
7.1.2 IEQ.....	90
7.1.3 Normas e Códigos.....	91
7.2 VALIDAÇÃO.....	91
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
BIBLIOGRAFIA.....	102
APÊNDICES.....	105
A1. DOCUMENTAÇÃO DO ALGORITMO.....	105
A2. MEMORIAL DE CÁLCULO DOS INDICADORES.....	116
A3. TABELAS DE REFERÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DOS INDICADORES.....	117
A4. FORMULÁRIO DE VALIDAÇÃO.....	119
A5. FORMULÁRIO PÓS-OCUPAÇÃO.....	121

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o panorama geral da pesquisa. São explorados sua justificativa, as perguntas norteadoras, o problema que busca resolver, e a hipótese formulada. Em seguida são explicados os objetivos pensados para responder às questões norteadoras e problemas formulados, e por fim apresentada a estrutura do trabalho.

1.1. JUSTIFICATIVA

Com o advento global da pandemia mais do que nunca as infraestruturas de saúde foram postas a prova. O alto volume de pacientes infectados exigiu de toda a gama de equipamentos médicos eficiência e adaptação à nova realidade, na qual os edifícios são cenários fundamentais no combate à crise global trazida pelo Covid-19. Dessa maneira, o bom planejamento arquitetônico cumpre papel de extrema importância no desempenho ao tratamento e diagnóstico, pois os arranjos internos dos edifícios dos equipamentos de saúde podem favorecer fluxos de maior segurança e eficiência no atendimento à pacientes, implementar padrões ambientais de higiene, bem como contribuir para as boas práticas apontadas nas legislações vigentes. Segundo Murphy (The Boston Globe, 2020) a arquitetura tem papel de contribuição nos processos de cura, pois se os espaços forem projetados adequadamente podem auxiliar na prevenção, contenção e tratamento de doenças infecciosas, incluindo a Covid-19.

A tipologia escolhida para estudo neste trabalho pertence aos serviços da medicina diagnóstica, a qual de acordo com Campana, Faro e Gonzales (2009) “é, hoje, um conglomerado de especialidades direcionadas à realização de exames complementares no auxílio ao diagnóstico, com impacto nos diferentes estágios da cadeia de saúde: prevenção, diagnóstico, prognóstico e acompanhamento terapêutico. Fazem parte deste mercado os laboratórios de patologia clínica/medicina laboratorial, de anatomia patológica, as clínicas de radiologia e imagem e de outras especialidades”. A medicina diagnóstica é uma área essencial para as rotinas médicas e durante a pandemia seu exercício ficou ainda mais evidenciado: as pessoas não infectadas buscam exames para obter informações sobre seu corpo e possíveis comorbidades; os pacientes infectados, por sua vez, necessitam de constantes e precisas atualizações da situação de seu organismo

para apontamentos de tratamentos mais efetivos; já os pacientes pós-covid necessitam monitorar suas condições fisiológicas e eventuais sequelas. Elegeu-se assim a medicina diagnóstica para compreender quais características destas arquiteturas têm maior impacto na performance e desempenho desses equipamentos.

O papel contemporâneo da arquitetura em um mundo pandêmico é debate latente, apontando que é extremamente urgente no atual contexto global contribuir para o aprofundamento do conhecimento acerca de equipamentos de saúde. A busca pela aplicação de recursos teóricos e instrumentais existentes de maneira inovadora e eficiente é um caminho possível para o desenvolvimento dos campos do conhecimento da Design Computacional, Análise de Performance, e Projeto da Arquitetura da Saúde. Portanto, avançar o conhecimento sobre uma tipologia arquitetônica essencial à medicina é um tema relevante, assim como utilizar instrumental consolidado na literatura para analisar essa complexa tipologia também é uma contribuição válida. Aprofundar essas áreas do conhecimento em consonância com o campo de Design Computacional, utilizando recursos digitais para implementação, simulação e instrumentalização do usuário arquiteto com interface dinâmica, se mostra de extrema relevância para com a situação do mundo.

Nourian (2016) aponta que em edificações complexas como hospitais, problemas de configuração podem levar a circulações sem eficiência, manutenção custosa, disfunção econômica, ou ainda problemas operacionais que podem afetar a segurança. O autor traz como proposição a essa problemática que necessitamos de abordagens que focam em explicitar as configurações dos edifícios, por um design e análise integrados, por *layouts* de arquiteturas sistêmicas, genéricas e intuitivas ao mesmo tempo.

O presente trabalho visa contribuir para os campos de Design Computacional, Análise de Performance, e Projeto da Arquitetura da Saúde. Para isso se propõe-se a aprofundar o conhecimento acerca do papel de ferramentas digitais no processo de tomada de decisão, planejamento e replanejamento de edificações em meios digitais. Busca-se compreender como os equipamentos de medicina diagnóstica podem ter suas qualidades analisadas de maneira a fornecer *feedback* informacional.

1.2. ÁREAS DE ESTUDO

O primeiro campo que o trabalho aborda são os modelos de **Análise de Performance (1)**, os quais estabelecem processo de mensuração dos indicadores e avaliação de seus resultados, buscando explicitar se o edifício atinge a qualidade necessária para o seu bom funcionamento. Ao longo do trabalho é apontado um percurso teórico de origem da análise de performance, justificando a importância da análise no processo de design, e qual o estado atual deste campo.

Os modelos de análise encontrados na literatura são explorados ao longo do trabalho, de maneira que as três etapas principais do processo de análise de performance implementado sejam esclarecidas: a modelagem, a mensuração, e a avaliação. O processo inicia-se inserindo todas as informações relevantes para o modelo realizar a análise de performance, na etapa de modelagem. Nesse momento a edificação é representada em ambiente computacional, para ter suas características analisadas. Em seguida, é realizada a mensuração de indicadores, os quais são capazes de representar quantitativamente aspectos que se deseja analisar. Para Júnior (2010) os “indicadores são formas de agregar e quantificar as informações de maneira que sua significância fique mais aparente”. O autor diz ainda que os indicadores podem simplificar as informações sobre fenômenos complexos tornando amigável o processo de comunicação. Portanto, ao definir elementos e variáveis, bem como modelar cálculos que permitam explicação simplificada de fenômenos inerentes às qualidades dos edifícios analisados, os indicadores se tornam recursos passíveis de interpretação clara da performance do objeto. Radford (2003) aponta que os indicadores de performance dispõem de afirmações quantitativas sobre atributos do design, que afetam o comportamento e funcionamento da edificação.

Em seguida, na terceira etapa, os resultados da medição dos indicadores devem ser avaliados, de maneira que seus valores sejam comparados com valores referência, apontando se seu resultado satisfaz as qualidades necessárias ou não, e assim auxiliar na tomada de decisão. Por meio de referências da literatura são estabelecidas metas, ou critérios mínimos e ótimos de certas qualidades do objeto, os indicadores, e assim realizam-se as avaliações de qualidade. Características como a área dos ambientes, a conectividade espacial, o isolamento entre fluxos, a ventilação ou ainda a permeabilidade do edifício são exemplos de indicadores

quantificáveis por medições de elementos arquitetônicos, capazes de atestar algumas qualidades performáticas do edifício. Interpretando os resultados dessa medição é que se analisa se o projeto está adequado aos padrões e objetivos necessários.

A segunda temática é o **Design Computacional (2)**, e sua escolha parte da compreensão que os sistemas computacionais são capazes de realizar processos com rapidez e assertividade, e são o ambiente adequado para implementação de modelos de análise de performance, e mensuração dos indicadores propostos. A capacidade de sistemas computacionais de manusear a complexidade de informações que estão contidas em um sistema, torna-os adequados para implementação de análise de sistemas arquitetônicos complexos, como no caso da tipologia de arquitetura de Medicina Diagnóstica.

Ao longo do trabalho, são expostos os primeiros casos da literatura a utilizar as ferramentas computacionais para a implantação de modelos de análise de performance, e qual o estado da arte desta temática. É exposto que utilizando recursos de modelagem paramétrica, modelos de informação da construção e modelos de simulação computacional, o manuseio do denso e complexo conjunto de informações de um objeto arquitetônico pode ser simplificado a um usuário, ampliando sua capacidade de tomada de decisão. O trabalho explora o uso de sistemas computacionais para implementação de modelos de análise de performance. Para isso, os indicadores assumem papel fundamental no processo de tomada de decisão em projeto, e gestão de edifícios. No contexto de países emergentes, a boa utilização dos recursos é fundamental, e sobre isso Gursoy (2015) apud Jorge (2018) afirma que “a construtibilidade de modelos digitais paramétricos usando baixa tecnologia e técnicas tradicionais de construção podem melhorar as práticas locais e induzir a designs otimizados em países emergentes.”

A terceira temática abordada é a da **Arquitetura da Saúde (3)**, para a qual será aplicado o conhecimento de análise de performance, e design computacional. Esse tema surge como contexto de aplicação do conhecimento e ferramentas, e é explorado no trabalho ao passo que a análise de performance é estruturada para avaliar as qualidades exigidas por essa tipologia. A arquitetura da saúde é utilizada como caso para ampliar a capacidade e qualidade da tomada de decisão por meio de indicadores, e o trabalho constrói conhecimento para a tipologia sistematizando, e implementando indicadores capazes de aferir as qualidades necessárias à

tipologia. É por meio da definição e modelagem dos indicadores de performance retirados da literatura que a temática da arquitetura da saúde é trabalhada.

A utilização de modelos computacionais de análise de performance para auxiliar no processo de tomada de decisão em edificações de medicina diagnóstica é um potente caminho, tanto para design de novos edifícios, como para manejo dos existentes. A realização da pesquisa proposta pode viabilizar a validação da aplicação desse recurso à tipologia estudada, e posteriormente a ampliação para demais áreas vitais à sociedade, propondo contribuição à qualidade do ambiente construído, e ao ofício da arquitetura.

1.3. PERGUNTAS NORTEADORAS

A partir dessa, problemática alguns questionamentos nortearam a estruturação da pesquisa:

- Como analisar a qualidade de objetos de arquitetura?
- Como a análise de indicadores pode otimizar as decisões envolvidas em um processo de projeto arquitetônico?
- Como ferramentas computacionais podem auxiliar no processo de análise de performance?
- Qual o estado da arte da análise de performance implementada em ambiente digital?
- Quais indicadores são mais importantes para o bom projeto/funcionamento de equipamentos de medicina diagnóstica?

1.4. PROBLEMA DE PESQUISA

O problema da pesquisa é a dificuldade do processo de decisão em design, e o impacto que as decisões têm na performance de um edifício. Por isso, a pesquisa busca caminhos para melhorar a qualidade da tomada de decisão, levando em consideração que meios digitais podem ampliar a capacidade de tomada de decisão do usuário (Lima, 2018).

Os problemas de tomada de decisão em design são difíceis de manusear, dificultados pela falta de explicitação das informações (Radford, 2003). Mitchell (1990) aponta que para encontrar soluções para um problema de design, deve ser

realizado processo de tentativa e erro, onde são geradas soluções, para então testar predicados e verificar quais são as soluções aceitáveis. A qualidade da tomada de decisão é inerente ao design e busca-se compreender como análises de performance fazem com que a tomada de decisão em design ocorra com a melhor assertividade e produtividade. Maver (1971) e Kolarevic (2014) apontam que é um desafio conceber uma ferramenta para auxílio da decisão em projeto baseado em performance.

1.5. HIPÓTESE

A hipótese fundante da pesquisa é que a implementação de um modelo computacional de análise de performance da tipologia pode levar a uma maior eficiência e assertividade no processo de tomada de decisão.

1.6. OBJETIVO

1.6.1 Geral

Produzir conhecimento aplicado sobre Análise de Performance em Arquitetura, por meio da implementação de uma ferramenta computacional. Para isso, o objetivo foi desenvolver artefato (algoritmo DSS BIM) capaz de analisar a performance de uma edificação em tempo real e auxiliar na tomada de decisão de projeto. Busca-se uma interface simplificada, na qual um arquiteto não programador possa ampliar sua capacidade de decisão por meio de *feedback* de performance.

1.6.2 Objetivos Específicos

1. Produzir conhecimento sobre Análise de Performance na arquitetura;
 - a. Elaborar revisão bibliográfica para fundamentação teórica sobre análise de performance em arquitetura;
 - b. Sistematizar quais as etapas, elementos e resultados de processo de análise de performance;
 - c. Elaborar *framework* de avaliação de performance baseado na literatura.
2. Produzir conhecimento aplicado ao campo da modelagem da informação da arquitetura. Compreender e validar as possibilidades de implementação computacional de análise de performance na tipologia selecionada;

- a. Fazer revisão do estado da arte das ferramentas computacionais aplicadas à performance em arquitetura;
 - b. Estruturar *framework* de interfaces de modelagem da informação para implementação de análise de performance;
 - c. Propor protótipo em interface computacional na qual o usuário consiga fazer análises de performance de maneira dinâmica, simples e rápida;
 - d. Validar com os pares os resultados do modelo.
3. Produzir conhecimento sobre a tipologia arquitetônica de Medicina Diagnóstica;
- a. Compilar exemplares;
 - b. Modelar em ferramenta computacional os exemplares;
 - c. Compilar indicadores nas normativas e certificações existentes;
 - d. Compilar indicadores aplicáveis na tipologia em revisão bibliográfica;
 - e. Modelar e implementar conjunto de indicadores para a tipologia de estudo;

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho é organizada conforme as etapas metodológicas apresentadas a seguir. O texto está estruturado em 8 capítulos, conforme figura 1.

O capítulo 1 é a Introdução. É apresentado aqui a questão e o problema de pesquisa, a justificativa, bem como a hipótese e os objetivos.

No capítulo 2 é apresentada a metodologia implementada, e os procedimentos de suas etapas.

No capítulo 3 são apresentadas as fundamentações teóricas, e a definição do problema conceitual que a ferramenta quer resolver. É apresentado o estado da arte e as lacunas existentes.

No capítulo 4 é apresentado o delineamento conceitual da ferramenta, apontando sua estrutura, fluxo, e usuários.

No capítulo 5 são apresentados os indicadores aplicáveis na tipologia de estudo, oriundos de pesquisa bibliográfica. Aqui os indicadores são apresentados e justificados a partir de eixos temáticos.

No capítulo 6 é apresentada a implementação computacional do artefato, mostrando as ferramentas utilizadas, a interface visual criada, e os resultados obtidos.

No capítulo 7 são apresentados os resultados da verificação de funcionalidade e validação de interface.

No capítulo 8 é apresentada a conclusão do trabalho. São sintetizadas as contribuições teóricas e práticas do trabalho, bem como as limitações encontradas no processo e as lacunas restantes para trabalhos futuros.

Figura 1 - Diagrama com estrutura do trabalho, listando capítulos.

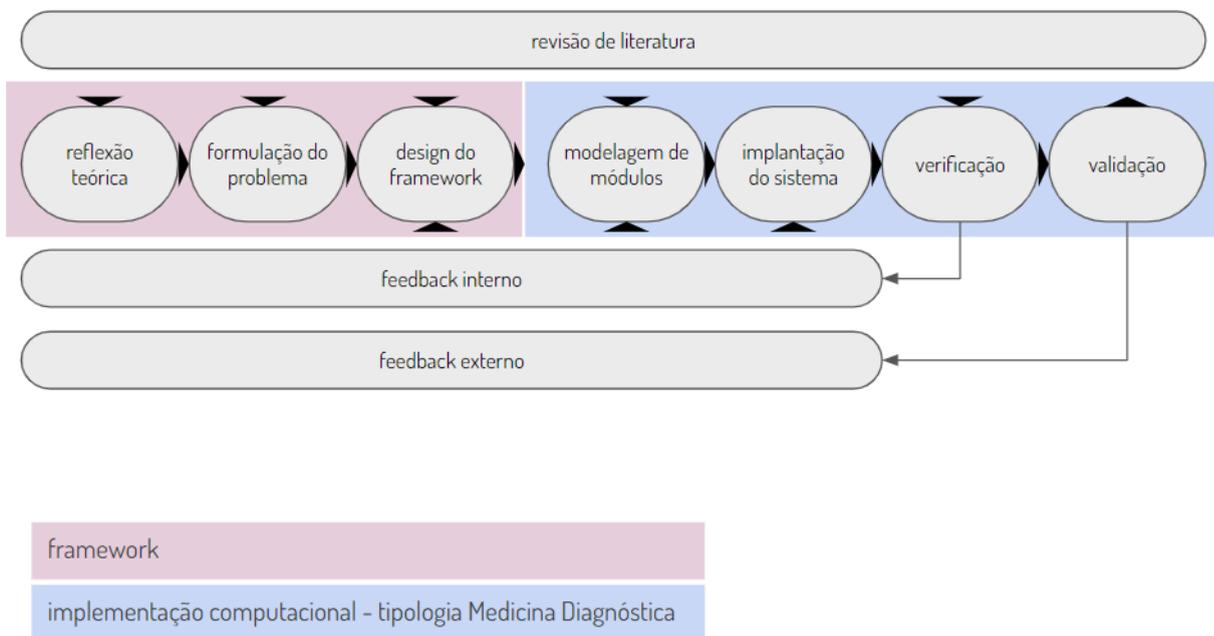


Fonte: autor (2023).

2. METODOLOGIA

A metodologia do presente projeto baseia-se na interpretação de Nourian (2016) acerca da *Design Science Research* proposta por Peffers, Tuunanen, Rothenberger e Chatterjee (2007). Os primeiros autores sugerem as etapas: identificação do problema, definição dos objetivos para a solução, design e desenvolvimento, demonstração, avaliação e comunicação. Já Nourian (2016) sugere uma alternativa em: formulação do problema conceitual, design e desenvolvimento, implementação, verificação e validação. Foi escolhida a DSR para elaboração do projeto, pois o objetivo central é desenvolver um artefato. Os capítulos do trabalho seguem a sequência da DSR: a formulação do problema conceitual está em Performance, Computação e Arquitetura (cap. 3); o design e desenvolvimento está em Design do *Framework* (cap. 4); a implementação está em Implementação: Medicina Diagnóstica (cap. 5) e em Implementação Computacional (cap. 6); e a verificação e validação está em Verificação e Validação (cap. 7).

Figura 2 - Diagrama com etapas metodológicas.



Fonte: autor, adaptado de Nourian (2017).

Cada etapa metodológica descrita a seguir possui um conjunto de atividades, que por sua vez, geraram um conjunto de entregáveis. Esses produtos representam o desenvolvimento da ferramenta até sua versão final, apresentada ao longo do trabalho. A tabela abaixo apresenta a relação entre as etapas, as atividades e os entregáveis.

Tabela 1 - Quadro com etapas>atividades>entregáveis.

etapa	atividade	produto
formulação do problema	revisão de literatura	<i>framework</i> conceitual
design do <i>framework</i>	concepção da estrutura computacional	fluxograma do algoritmo
implementação	revisão de literatura para encontrar indicadores adequados para avaliar a qualidade de edificações, com foco na área da saúde	tabela descritiva do cálculo de indicadores
implementação	compilação de valores de referência na literatura, para avaliação de indicadores	tabela com valores de referência
implementação	implementação do artefato proposto na interface de programação visual	software do artefato
verificação	coleta de dados indireta documental: compilar desenhos técnicos de exemplares da tipologia e modelá-los	arquivo com os exemplares da tipologia
verificação	aplicar a ferramenta nos exemplares, comparando os resultados simulados com valores reais e pós-ocupação	tabela comparativa entre simulação x expectativa melhorias no software
validação	validar a ferramenta com projetistas e analistas de projeto especializados em projetos da saúde	formulário de <i>feedback</i> melhorias no software

Fonte - Autor, 2023.

2.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Para a formulação do problema conceitual, o trabalho realizou uma revisão bibliográfica abordando os principais eixos temáticos para encontrar qual o estado da arte, e quais são os problemas enunciados.

Buscou-se inicialmente construir uma base conceitual, composta em quais as origens e fundamentos da análise de performance em arquitetura. Em seguida, em revisão de literatura, buscou-se compreender qual a melhor estrutura para implementação de uma ferramenta de análise de performance. Para isso foi realizada pesquisa bibliográfica nos repositórios que indexam trabalhos de design computacional, buscando pelos termos “*performance*”, “*building*”, “*analysis*”. Nos trabalhos obtidos foi realizada uma leitura exploratória, que visava classificar os textos com tags temáticas referentes às tecnologias utilizadas, à qual a abordagem sobre performance utilizada, e referente à tópicos que as literaturas base apontaram como lacuna. Dessa maneira foi construída uma matriz de estado da arte, da qual foram obtidas duas principais informações: de onde o *framework* deveria partir, e quais funcionalidades novas deveriam ser implementadas.

O resultado do problema conceitual foi um delineamento conceitual do artefato do trabalho, que será explanado à frente no texto (ver capítulo Problema Conceitual). Daqui tirou-se a base para o design do *framework*, etapa seguinte da metodologia.

2.2 DESIGN DO *FRAMEWORK*

O design do *framework* parte do problema conceitual. Nessa etapa é concebido o algoritmo, apontando ferramentas, definições computacionais, *workflow* e processos adequados para o desenvolvimento do artefato. O produto dessa etapa é o fluxograma do algoritmo, com as ferramentas computacionais definidas, bem como seus inputs, operações e outputs. Aqui é delimitado como será a interface de análise de performance utilizando interface de modelagem paramétrica e modelagem BIM. Um aspecto importante nessa etapa é a abordagem modular utilizada, que visa dar versatilidade à implementação computacional.

São demonstradas e explicadas as três etapas do *workflow*: modelagem, medição e avaliação. A modelagem é quando o usuário representa em ferramenta

digital as informações do design; a medição é quando os indicadores são medidos a partir do modelo criado; e a avaliação é quando os valores medidos dos indicadores são comparados com referências, para apontar se estão satisfatórios ou não. A medição e a avaliação ocorrem por meio de módulos, que serão criados na implementação para digitalizar a análise de indicadores.

A etapa do design do *framework* propõe, portanto, todas as etapas computacionais, e quais os papéis do usuário no processo. O objetivo do trabalho de desenvolver interface computacional que auxilie a tomada de decisão baseada em performance é efetivado com a proposição de interface que represente os resultados em tempo real da avaliação dos indicadores, concebido na etapa de design do *framework*.

Importante ressaltar que até aqui ainda não há implementação computacional na tipologia selecionada para o trabalho, mas apenas a composição da ferramenta desenvolvida. A etapa seguinte, ainda não realizada até o momento, aborda essa temática.

2.3 IMPLEMENTAÇÃO

A implementação da ferramenta proposta consistiu em programar um sistema computacional capaz de medir os indicadores de edificações da saúde. O framework proposto coloca o usuário como personagem central da tomada de decisão ao manusear um modelo BIM e interpretar as informações representadas pelos indicadores em interface de programação visual (IPV). O artefato é um dispositivo capaz de representar a análise de indicadores em uma interface, lendo em tempo real os dados do modelo BIM manuseado pelo usuário e apresentando gráficos intuitivos para *feedback*. Tal modelo computacional de análise foi desenvolvido utilizando edifícios amostrais da tipologia, que serviram de base para a programação dos módulos do sistema.

Para implementação dos módulos, inicialmente foram definidos e descritos os indicadores. O primeiro passo para isso foi realizar uma revisão bibliográfica que buscou quais são os indicadores adequados para avaliar a qualidade de edificações da saúde. O primeiro produto dessa revisão foi uma planilha descritiva do cálculo de indicadores, apontando de cada indicador qual o autor, quais as variáveis de entrada, qual o cálculo e sua finalidade. Em seguida, foi necessário modelar os indicadores em ambiente digital utilizando a interface de programação visual (IPV)

Grasshopper e alguns de seus plugins. Cada indicador foi implementado em um módulo de medição e outro de avaliação, e um dos produtos da etapa da implementação foi a programação desses módulos. Os módulos utilizados para medir alguns dos indicadores implementados aproveitaram sistemas desenvolvidos e disponibilizados por outros autores, adaptados para se encaixarem com o desenho do sistema. Já outros indicadores tiveram seus módulos de medição desenvolvidos pelo trabalho, usando a IPV.

Para ter uma base que ajudasse a implementar a ferramenta já pensando em projetos reais, foram modeladas em BIM amostras da tipologia arquitetônica de estudo. Os exemplares foram oriundos de coleta de dados indireta de documentação arquitetônica de exemplares, processo no qual contataram-se *stakeholders* do setor privado e público para obtenção dos dados. Uma empresa de Fortaleza - CE aceitou ser parceira da pesquisa e disponibilizou os dados arquitetônicos de 4 unidades de coleta de análises clínicas. Uma vez com esses dados compilados, os exemplares foram modelados em software BIM Archicad, no qual tiveram sua forma, materialidade e outras informações documentadas para serem inseridas no sistema implementado computacionalmente. Usando os modelos amostrais que se programaram os módulos de medição e avaliação.

Na implementação também foi elaborada a tabela de valores de referência, que serve de base para o processo de avaliação, valores que comparados entre os valores medidos nos indicadores, ajudam a explicitar um resultado de adequabilidade do indicador. Nessa tabela foram compilados da literatura valores mínimos e máximos (principalmente para indicadores normativos, como área mínima), e também valores ideais para determinado indicador. Dessa maneira, o resultado da medição do indicador é dividida pelo valor de referência e o resultado obtido sugere uma interpretação ao usuário, ou seja, representa a avaliação. A partir do valor da razão entre a referência e o valor medido, o sistema cria um código cromático que sinaliza para o usuário ambientes de atenção ou ainda pontos de inviabilidade, ou seja, ambientes que os indicadores não estão satisfatórios. Dessa maneira foi estruturada a interface de visualização: a planta do edifício foi representada por meio de polígonos seguindo o código cromático da avaliação: ambientes reprovados em vermelho, ambientes de atenção em amarelo, e ambientes satisfatórios em verde. Com esse algoritmo criado, foi possível distribuir cópias da planta em um dashboard visual, onde cada cópia representa um indicador

diferente a ser analisado. Para a interface também foi desenvolvido dashboard geral, onde é possível ver todos os indicadores.

2.4 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

A etapa seguinte foi a de verificação e validação, buscando revisar a ferramenta frente à assertividade, usabilidade e eficácia. Como ferramenta de avaliação, Henver (citado por Dresch, Lacerda and Antunes Jr., 2015) descreve um método para avaliar artefatos de sistemas de informação composto por dois testes: um teste funcional (*Black Box*), e um teste estrutural (*White Box*). No teste *Black Box* é verificado se todas as funções internas funcionam como esperado, ou seja, se os inputs geram os outputs propostos conceitualmente. No teste de *White Box* o artefato é validado enquanto interface para o usuário, testando quão satisfatórias são suas funcionalidades e utilidades sem compreender a estrutura interna computacional.

Alinhado com essa metodologia, Nourian (2016) propõe processo de avaliação do artefato composto por duas etapas: verificação e validação. Verificação para o autor é o teste interno se as ferramentas estão matematicamente corretas, e se as operações geométricas estão operando como esperado. Ou seja, os dados são representados em visuais para testar se os resultados da ferramenta estão iguais aos das equações. Já a validação para o autor serve para verificar se o artefato atende as necessidades dos usuários e *stakeholders*. É mais voltada para saber a pertinência de um objeto, se ele é adequado para a finalidade proposta. Para revisão dos pares acadêmicos Nourian (2016) sugere que por meio de publicações científicas, pode-se comprovar a validade do artefato.

Nesta etapa houve ciclo constante com a implementação, pois a cada versão do sistema eram analisados elementos do algoritmo e do fluxo que poderiam ser melhorados. A verificação e validação dos componentes do sistema foi um processo repetido em todas as fases da implementação, módulo a módulo, visual a visual. Esse processo mostrou caminhos para um algoritmo mais eficiente e que cumprisse seu propósito de *feedback*.

2.4.1 Verificação

O processo de verificação ocorreu desde as etapas iniciais da implementação, onde ao passo que se programava o sistema, se testavam as

funções em busca de melhorias e ajustes. Para realizar as verificações, o sistema foi implementado nos exemplares da tipologia coletados e modelados em BIM. Nos exemplares foram medidos os indicadores e gerados dashboards utilizando a ferramenta proposta, e verificados todos os módulos e seus mecanismos, conforme proposto na implementação. Testaram-se aqui se as funcionalidades estavam operando de acordo com o esperado, se os cálculos de medição dos indicadores estavam corretos, se as avaliações estavam comparando corretamente os indicadores medidos com os *benchmarks*, e se os gráficos visuais estavam apresentando as informações coerentes com os cálculos da avaliação.

Os indicadores simulados foram comparados com os valores reais medidos manualmente (para os casos dos indicadores objetivos) e comparados com dados coletados por meio de formulários pós-ocupação (ver nos apêndices) com os usuários das edificações (para os casos dos indicadores subjetivos). As inconformidades encontradas neste momento foram ajustadas no algoritmo do sistema para maior assertividade.

2.4.2. Validação

A validação focou em aspectos da estrutura do artefato, na efetividade de seu comportamento, na usabilidade e no impacto gerado na produtividade (Dresch, Lacerda e Antunes Jr., 2015). Para isso foi realizada uma oficina de apresentação da interface, debate e coleta de *feedback* por meio de formulário (ver nos apêndices) com uma empresa especialista em projetos de saúde, GreenBrazil. O portfólio de projetos da GreenBrazil conta com mais de 100.000 m² projetados na área de projetos de saúde, em programas hospitalares, laboratoriais e outros. A partir dos dados coletados pelo formulário, foram realizadas melhorias no sistema e na interface.

3. PERFORMANCE, COMPUTAÇÃO E ARQUITETURA

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos que orientam o trabalho. Em um primeiro momento as ontologias base, em seguida a importância da computação para o estudo da performance, e por fim é definido o problema conceitual a partir de revisão bibliográfica.

3.1. ONTOLOGIAS

O processo de design arquitetônico é a cíclica tentativa de criar algo novo capaz de cumprir um conjunto de propósitos. Para isso, duas atividades baseadas no conhecimento operam: a geração de formas, opções e soluções; e a análise preditiva que verifica se as opções geradas vão atender aos seus objetivos. Dessa maneira o conhecimento não só cumpre papel de vocabulário criativo, baseado nas experiências existentes acumuladas e sistematizadas, mas também serve como mecanismo capaz de pôr o objeto criado à prova dos fenômenos nos quais ele irá operar. No presente capítulo nos interessa fundamentar um percurso teórico do conhecimento construído para dispositivos de predição de performance, a fim de compreender qual o paradigma contemporâneo para análise de edifícios em ambiente computacional.

Uma das primeiras bases para a construção de tal conhecimento foi nomeada de morfogênese (Goethe, 1806), campo no qual se buscava entender como uma forma era construída, jogando luz aos processos de formação. Interessado em declarar e decodificar quais etapas de transformação uma forma sofria para assumir seu estágio final, Goethe construiu um olhar fundamental para o processo de geração de forma. Não interessava a esse autor apenas a forma final isolada, pois compreendia a importância dos motivos que a geraram, e das mudanças de estado que ela sofria, tornando o foco no processo de formação um dos caminhos para a construção do conhecimento de design. Thompson (1917) acrescentou que os processos de formação são regidos por forças e pressões ambientais, e essas determinam a geração das formas. Por meio dessa abordagem foi estabelecido um diálogo entre o contexto que um objeto se insere e os atributos que sua forma carrega, apontando uma constante tentativa de adaptação para melhor performance. Tais campos de força podem ser representados matematicamente, porém são de imensa complexidade e estavam muito além do poder de análise do início do século

XX, e por isso a ciência utilizava-se de simplificações das causas de um fenômeno para fins de descrição e representação. Dessa maneira, construir conhecimento do ambiente que o objeto pertence pode ser feito ao decodificar as forças ambientais que ele sofre, e construir modelos preditivos capazes de avaliar a operação do objeto em seu contexto, e assim apontar sua adequabilidade. Portanto, as forças que determinam os processos de formação são fundamentais para o conhecimento envolvido no processo de design, pois os artefatos são criados para bem operar dentro do ambiente que estão inseridos, e suas performances serão condicionadas por isso.

A construção do conhecimento necessária para o design precisou então de dispositivos capazes de considerar a complexidade como um fator inerente aos processos, eventos e forças do mundo. A prática científica de segmentar as coisas em pequenas partes isoladas mostrou-se míope ao passo que o mundo mostrava-se cada vez mais conectado e complexo. Sabia-se que os edifícios tinham influências ambientais, sociais e econômicas, mas precisava-se de uma estratégia para abordar o conhecimento de forma integrada. Dessa maneira encontrou-se na teoria geral dos sistemas ontologia necessária para abordar fenômenos dinâmicos, na qual não é suficiente isolar os objetos em unidades, mas é necessário compreendê-los como um todo (Bertalanffy, 1969). Em contraste ao antigo paradigma reducionista de isolamento entre as partes, o pensamento sistêmico dá ênfase para as relações estabelecidas entre elas, as encarando como um conjunto dinâmico de relações. Alexander (1968) enfatiza a importância de olhar para o “todo” das coisas e encará-las como sistemas, em oposição a separá-las em partes isoladas. Nos interessa sua abordagem, pois ele identifica no design um processo de leituras e respostas para as condicionantes, visando a sincronia entre o objeto e seu contexto, numa incessante busca dos sistemas pela estabilidade.

Adotaremos a definição de sistema feita por Vieira (2003): “dado um agregado (m) de coisas, este agregado forma um sistema quando, por definição, existir um conjunto de relações, R, entre os elementos do agregado tal que isto permita ~ emergência de propriedades partilhadas ou permita uma propriedade projetada para o sistema, P. Tal propriedade, no caso dos sistemas artificiais, caracteriza o que chamamos objetivo.” As propriedades são aspectos fundamentais de um sistema, pois são os atributos de seu funcionamento, e Vieira conceitua Permanência, Ambiente, Autonomia, Composição, Conectividade, Estrutura, Integralidade,

Funcionalidade e Organização, propriedades que nos são importantes para estabelecer abordagem sistêmica para construção do conhecimento em design. A permanência é o parâmetro primordial de um sistema, pois aponta sua busca por continuar existindo em seu ambiente. De semelhante importância, a complexidade é parâmetro que percorre todos os aspectos de um sistema. A conectividade exprime a capacidade das partes do sistema estabelecerem relações entre si e com o ambiente. A estrutura é a quantidade de relações e conexões estabelecidas pelo sistema. A integralidade é propriedade que representa a capacidade de os elementos do sistema formarem “ilhas” ou agrupamentos de alta conectividade, dando caráter heterogêneo à composição das partes. Segundo Vieira (2003) “isso ocorre porque a permanência exige que o sistema seja coeso o suficiente para sobreviver a crises, mas flexível o suficiente para adaptar-se a elas na medida do possível”. A existência desses agrupamentos, ou subsistemas, permite a emergência de funções distintas, propriedade chamada de funcionalidade. Já a organização é resultante do crescimento dos demais parâmetros, e aponta para o caráter do sistema como um todo ontológico. As propriedades de um sistema desenvolvem estratégias de adaptação, fruto das necessidades do sistema e de seu ambiente, e resultam em uma interface que reflete o grau de complexidade do sistema e seu ambiente (Vieira, 2003). Nos interessa na definição de Vieira (2003) a luz que joga sobre os sistemas artificiais, dentre os quais o processo de design, pois ter um objetivo é propriedade básica de sua existência.

Uma das ferramentas essenciais para a adaptação que visa a permanência de um sistema é o *feedback*, ou seja, sua capacidade de reinserir informações resultantes da sua operação de maneira que o processo seja ajustado para atingir a estabilidade do sistema (Bertalanffy, 1969). Nesse processo as informações de saída de um sistema são reinvestidas para prover uma constante reavaliação do estado de funcionamento. A adaptação ao ambiente motivada pela permanência ocorre em um primeiro momento reconhecendo o desempenho de um sistema frente ao seu contexto, e tomando partido dessa informação para mudar a forma/estado do sistema visando melhor performance. O *feedback* é processo fundamental para a evolução dos sistemas naturais, buscando perpetuação por meio de adaptações ao meio, o que não é diferente nos sistemas artificiais. Já sabemos que sistemas artificiais têm como propriedade primordial um objetivo definido na concepção do sistema, e o *feedback* é um dos dispositivos capazes de aferir a eficácia e eficiência

do cumprimento de tarefas. Portanto, os arranjos de *feedback* nos interessam, pois o processo dinâmico de design parte da intenção de atender a um predicado, atingir uma qualidade almejada, e garante-se isso por meio de loops de *feedback*. Há nos sistemas mecanismos cíclicos nos quais seus resultados são monitorados e avaliados visando atingir um objetivo, e isso se dá por meio do processo de “tentativa e erro”. Sistemas baseados em regulação, controle, ajuste e propósito por meio de *feedback* são pertencentes ao campo da cibernética, apontada por Pask (1969).

É da natureza de sistemas dinâmicos/processuais como o design, que seus resultados sejam um “estado” dentre diversos “estados”, dados os inputs, outputs, e cabe ao projetista a tarefa de modificar progressivamente a forma, reavaliando sistematicamente seu funcionamento (Alexander, 1968). Portanto, o design tem a atividade cíclica de geração e avaliação de diferentes instâncias. O processo de avaliação, ou de *feedback*, serve à problemática da tomada de decisão visando a performance (ou adaptação ao ambiente e contexto), pois é regulador da boa solução. É mecanismo que vai apontar se a opção gerada atende ao predicado, ou devem ser modificadas/geradas novas opções.

Para pôr as diversas instâncias de um sistema à prova frente às forças ambientais são necessários conhecimentos capazes de construir modelos preditivos do comportamento dos artefatos em seu contexto. Por meio da descrição quantitativa das forças ambientais, é possível testar a performance de um objeto, e lançar mão desses modelos no processo de design permite que sejam tomadas decisões baseadas na performance. Já sabemos que um sistema artificial busca atender a um objetivo traçado, e é importante ter clareza que quem determina suas metas são os *stakeholders* responsáveis por sua existência. Radford (2003) define o ponto de partida de um sistema baseado em performance na definição das performances almejadas em relação aos objetivos. Esses guiam a escolha de quais elementos são observados, de quais relações são representadas, de qual escala e resolução são descritas. Os objetivos são medidos por meio de indicadores de performance, entidades quantificáveis que atestam a adequação da instância a suas metas. O processo de avaliação de performance ocorre com a ponderação de valor dessas métricas, criando uma hierarquia que satisfaça o critério de qualidade dos *stakeholders* (Radford, 2003). A performance pode então ser entendida como a eficiência que o sistema atinge seu objetivo, o qual tem perfil de valor atribuído por

quem o concebe, ponderação que representa um grande desafio para os designers (Kolarevic, 2014). Bernal (2015, apud Álvares 2020) aponta que métodos de tomada de decisão “refletem os trade-offs, valores e preferências por meio de indicadores quantitativos atribuindo pesos aos critérios para serem avaliados de acordo com as preferências do designer”. Portanto, tais sistemas atendem a um conjunto de interesses visando um impacto esperado e devem ser entendidos como um dispositivo de transformação do mundo.

O design arquitetônico tem natureza de grande complexidade, pois as construções performam em aspectos econômicos, sociais e culturais e por conta disso os problemas de design são notoriamente difíceis de gerenciar (Radford, 2003). O processo de design consiste na constante decisão sobre a forma equalizando os diferentes aspectos que compõem o ambiente, buscando adequar-se aos objetivos traçados. Um sistema edificado estabelece inúmeras relações com o ambiente externo, bem como suas partes também estabelecem relações entre si. Um edifício pode ser desmembrado em diversos subsistemas, como econômicos, físicos e sociais, e cada um desses possui características únicas, e inter relacionadas.

3.2. COMPUTAÇÃO E PERFORMANCE

Na década de 60 sabia-se que sistemas artificiais seriam potencializados pelo auxílio de computador, o qual possibilitaria modelagens mais complexas do ambiente, caminhando em direção à uma base ampla de disciplinas, como sociais, ecológicas, econômicas, etc (Pask, 1969). O complexo conjunto de dados de design podia ser melhor manipulado e gerenciado em uma abordagem de design computacional, na qual Mitchell (1990) aponta que seus processos são executados para a exata solução de um específico e complexo conjunto de inputs iniciais. Entende-se que a computação é um processo lógico, um conjunto de regras ordenadas que geram um resultado, e nela há uma capacidade de manipular quantitativamente volumes maiores e mais complexos de dados. O meio usado para representar a computação espacial são os algoritmos, que para Woodbury (2010) são como receitas, listas de instruções a serem seguidas segundo uma ordem e com um objetivo. Uma vez aberto o campo da computação, conceberam-se os primeiros sistemas de “computer-aided design (CAD)”, nos quais o foco do designer

é representar a forma dos objetos por meio de parâmetros e operações dentro de ambientes digitais, virtuosos por sua confiabilidade, velocidade e clareza. O processo de design pôde ser então realizado por descrições geométricas explícitas, coordenadas e organizadas, e a representação de forma passou a ser computadorizada, ou seja, implementada em um computador, no qual os programas armazenam dados inseridos, como por exemplo as coordenadas cartesianas de dois pontos, e seu vínculo para estabelecer uma linha.

A exploração da capacidade de construir modelos complexos abriu portas para a criação de ferramentas preditivas, capazes de simular uma edificação em seu contexto múltiplo, e a analisar perante diversos aspectos. Se tornou possível por meio da computação a implementação de críticos artificiais capazes de aplicar conhecimentos para produzir avaliações das proposições de design (Mitchell, 1990). Os primeiros a pesquisar sobre a implementação de ferramentas de análise digital de performance iniciaram na década de 60, e já na década de 70 tinham em mãos módulos computacionais que davam *feedback* ao designer sobre suas proposições de design (Kolarevic, 2014). Ao início da década de 80 já haviam modelos preditivos capazes de visualizar tridimensionalmente os edifícios, e simular alguns indicadores de performance ambiental. A estrutura desses modelos era pautada no *feedback*, no qual o usuário inseria uma instância de design, recebia uma avaliação, e decidia quais modificações eram necessárias, até determinar o fim do procedimento computacional - que segundo Mitchell (1990) é quando o predicado inicial é atendido, e caso ainda não satisfaça deve-se operar o objeto recursivamente até atingir o objetivo.

A estrutura computacional proposta nos sistemas atuais focados em performance ainda segue modelo composto por quatro etapas: representação, medição, avaliação e modificação, proposto por Thomas Maver (1980). A etapa de representação é onde o projetista insere no sistema a opção de design que quer testar; em seguida na mensuração, o software simula o comportamento do design, e calcula diversos indicadores de performance relevantes; na avaliação o projetista juntamente com os *stakeholders* realizam um julgamento dos valores e decidem quais devem ser as modificações no design. (Thomas Maver, 1980). A representação visual cumpriu papel essencial na implementação computacional desses dispositivos de *feedback*, e o poder de comunicação trazido por ela aumentou a qualidade da decisão tomada pelo designer.

O avanço das “performance appraisal aids”¹ no fim do século XX ainda não era capaz de contemplar a grande complexidade da arquitetura, sendo sua maioria com foco extremamente fechado em um aspecto performático. A falta de modelos críticos de base ampla de conhecimento já era considerada uma lacuna por Mitchell (1990), mas os recursos tecnológicos não permitiam sua implementação à época. Kolarevic (2014) aponta que muitas ideias visionárias de base ampla existentes só estão se tornando viáveis atualmente. Jin (2019) aponta que a análise de performance da construção, ou BPA (*building performance analysis*) pode proporcionar *feedback* ao design e facilitar a otimização.

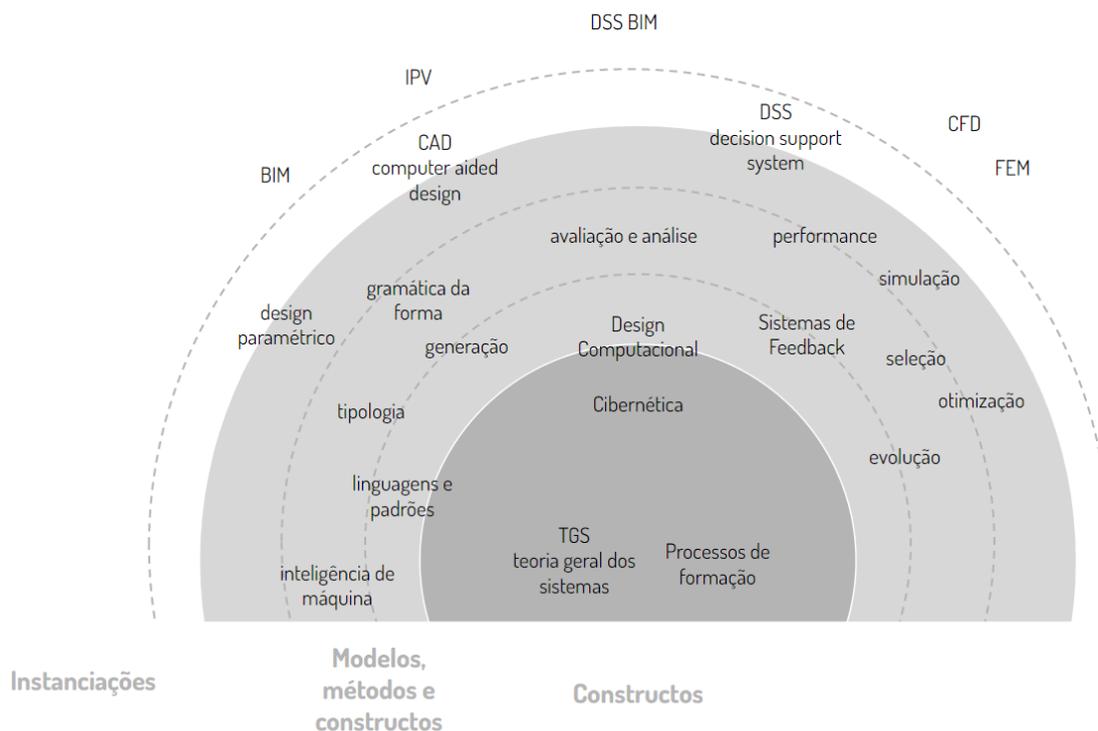
A emergência de sistemas de modelagem paramétrica baseados nas relações geométricas aumentou a capacidade do designer de lidar com a complexidade, por meio de uma combinação de representações geométricas, visuais, simbólicas e algorítmicas de objetos (Woodbury, 2010).

Dentre tais tecnologias, estabeleceu-se na virada do milênio o BIM (modelagem da informação na construção), incorporando sistemas de modelagem tridimensional com ferramentas voltadas para a construção, nas quais os elementos construtivos podem ter sua geometria e suas informações caracterizadas. O BIM passou a ser o tipo de processo computacional central para as áreas de design, definido por Underwood e Isikdag (2010, apud Manzione) e Manzione (2013) como processo baseado em modelos digitais, integrados, interoperáveis e semanticamente ricos. Em suas definições possui ferramentas paramétricas de elementos construtivos, nas quais o designer os modela, opera e configura, carregando-o de informações para além da geometria, ao definir materialidade, preço ou outro dado. O produto da modelagem é uma representação do edifício por meio de elementos com variáveis pré definidas, e não é foco do BIM representar a morfogênese do objeto. Suas ferramentas são voltadas para a modelagem de atributo, ou seja, é modelado um retrato do estado da edificação, e não o processo de formação e lógica por trás da composição, disposição e definição dos elementos. Não obstante, há hoje um outro conjunto versátil de sistemas para lidar com os problemas complexos de design, os quais são capazes de modelar algoritmos, ou seja, lógicas de fluxo de informação e forma.

¹ “performance appraisal aids” do inglês de “auxiliares de avaliação de performance” citado por Kolarevic (2014)

Dentro do campo do design computacional, são as ferramentas de programação CAD caminho para soluções customizadas, nas quais o usuário pode realizar uma modelagem de processo, representando em meio digital todas as mudanças de estado que uma forma sofre, e suas respectivas operações. Encarar o design como uma atividade maleável baseada em relações, não como uma entidade fixa, abre a oportunidade de explorar, testar e avaliar opções de design (Woodbury, 2010). Para isso existem diferentes soluções de interface para o designer codificar seu processo, desde scripts alfanuméricos que exigem alto grau de conhecimento de sua sintaxe, mas também IPV (interfaces de programação visuais) interativas e de mais fácil assimilação por designers “pouco programadores”.

Figura 3 - Diagrama síntese de revisão de literatura, mencionando constructos, modelos, métodos e instâncias que são base para o trabalho.



Fonte - Autor, 2022.

3.3. PROBLEMA CONCEITUAL: DELIMITAÇÃO DO ARTEFATO

A definição do problema conceitual ocorreu por meio de revisão de literatura, na qual foi realizada pesquisa temática, exploração dos textos, e classificação temática. A partir da classificação temática, buscou-se compreender quais estruturas computacionais melhor podem implementar um sistema de análise de performance (1), quais características dos modelos atuais (2), e quais as lacunas a serem exploradas (3).

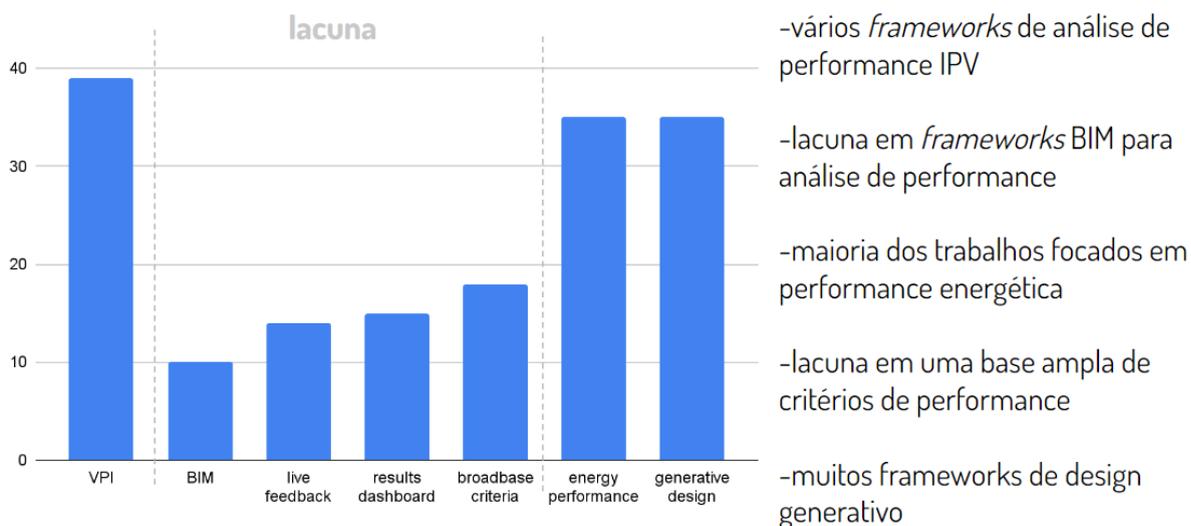
O primeiro procedimento foi pesquisar pelos termos “*performance*”, “*building*”, “*analysis*” no repositório Cumincad, voltado à área de design computacional, incluindo recorte temporal de 2019 até 2023. Escolheu-se esses termos devido ao objetivo de design definido: desenvolver uma ferramenta que auxilie a tomada de decisão por meio de análise de performance.

Foram compilados 63 artigos encontrados na pesquisa, os quais foram classificados com *tags* buscando quais tecnologias utilizaram para implementação, quais modelos de *feedback* foram implementados e quais aspectos/indicadores de performance consideraram para BPA. Dessa maneira foram identificados os temas mais frequentes, e os temas que indicam lacuna na literatura, conforme a figura 4.

Em paralelo foram selecionadas teses, dissertações e capítulos de livros que também contemplavam os termos, mas expandiram o recorte temporal. Neles foram buscados modelos, e lacunas já identificadas na literatura.

Em termos de interfaces computacionais, foi encontrado que a IPV deveria ser ponto de partida para a concepção do *framework*, e o BIM ainda era ferramenta que cabe muitos desenvolvimentos na direção da BPA. Encontrou-se uma lacuna nos modelos *feedback* implementados, onde poucas ferramentas dispõem ao usuário interatividade em tempo real para tomada de decisão. Não obstante, muitos modelos implementados já exploram análise de performance integrando com automação na geração de opções de design, diferentes de processos que o designer é responsável pela concepção. Sobre os indicadores que eram abordados pelas BPA da literatura, havia um foco majoritário em aspectos da performance energética, deixando uma lacuna em abordagens que ampliassem esse escopo.

Figura 4 - Gráfico com classificação temática, resultado de revisão de literatura..



Fonte: autor, 2022.

O gráfico acima representa uma síntese do que foi encontrado no primeiro procedimento para definição do problema conceitual. A partir da definição e análise dessas temáticas, foi realizada revisão da literatura compilada nesta pesquisa, em conjunto com textos representativos para a compreensão da implementação de um *framework* BPA. A seguir estão as questões identificadas na exploração dessa literatura, apontando os elementos que devem ser incorporados na ferramenta.

Uma das questões atuais de pesquisa em performance é como integrar as diferentes disciplinas envolvidas em um design de edificação, utilizando-se da disponibilidade de modelos e softwares capazes de realizar simulações de performance dos mais variados eventos e fenômenos complexos. Lima (2018) afirma que para os edifícios “são necessários mecanismos que possibilitem a análise dos aspectos de performance, função e custo de seus projetos – ferramentas integradas inseridas no paradigma de projeto do BIM” (a). Szentesi-Nejur, de Luca e Nejur (2021) apontam que a separação da performance das etapas de design na arquitetura não permite a exploração do potencial das simulações para melhor conforto e eficiência. Simulações estruturais em modelos de elementos finitos (FEM), simulações de ventilação em modelos de dinâmica dos fluidos (CFD) e diversas outras aplicações já são realidade na prática da construção civil, e se integradas ao processo de design podem contribuir para maior eficiência na tomada de decisão.

A emergência do BIM progride em direção a um processo de design que integra a concepção e o gerenciamento de uma edificação, bem como as diferentes disciplinas envolvidas. A interoperabilidade (b) proporcionada pelas novas aplicações computacionais é um fator chave para o processo de avaliação de performance de uma edificação, pois a representação necessária para cada disciplina pode agora vir de modelo unificado, de base única. É possível hoje que cada profissional parta de uma modelagem computacional unificada da edificação, e no ambiente computacional específico de sua disciplina realize as simulações e determinações técnicas necessárias para desenvolvimento do edifício.

Os modelos existentes estão presentes em todas as etapas de concepção, desde o pré-design, até as etapas de detalhamento construtivo. Porém, muitas delas concentram-se nas etapas que as definições gerais de projeto já estão tomadas, exigindo alto grau de detalhamento e resolução, operando em escalas muito pequenas e técnicas. Dessa forma, há menos ferramentas de simulação disponíveis para as etapas com decisões iniciais, então de maior escala de design, que têm potencialmente maior impacto performático. Um grande desafio apontado por Kolarevic (2014) é o desenvolvimento de “performance appraisal aids” de baixa resolução, capazes de serem alimentados com modelos de baixo nível de desenvolvimento e darem resultados úteis para a tomada de decisão em design (c). Para designers, utilizar modelos orientados por performance nas etapas iniciais ainda é uma dificuldade, e só é possível integrando diversos modelos em uma interface de modelagem da construção, e motores de cálculo de performance (Alassaf e Clayton, 2021).

Nas tecnologias contemporâneas de modelagem da construção, em específico o BIM, há uma classificação para o grau de representação do modelo, o nível de desenvolvimento (LOD). Nele é definida uma progressão de valores, em uma escala de 100 à 500. O LOD 100 representa a fase de pré-design/estudo de viabilidade; 200 a fase de estudo preliminar, com geometrias aproximadas; 300 a geometria precisa, equivalente a fase de anteprojeto, e projeto legal; 400 representa a fase de detalhamento construtivo para execução; até o 500 que representa um as-built. Devido à quantidade de informações disponíveis em cada escala LOD, há uma abordagem adequada para a medição e análise de performance em cada estágio do processo de design, progredindo em complexidade juntamente ao desenvolvimento do modelo.

Protocolos que definem as boas práticas de modelagem BIM descrevem a análise de performance em modelos de acordo com o LOD, sendo os mais baixos restritos a indicadores preliminares, e os mais altos com maior grau de assertividade. Partindo de protocolos internacionais, Manzione (2013) propõe uma sistematização de quais aspectos de uma edificação podem ser avaliados em cada LOD (d), descrevendo indicadores para cada etapa por LOD para: planejamento de obra, custo de obra, cumprimento do programa de necessidades, materiais sustentáveis, análises e simulações ambientais.

Tomando o aspecto do custo de obra para ilustrar o modelo de Manzione: em LOD 100 o custo é calculado por metro quadrado; LOD 200 o custo é calculado baseado na dimensão dos elementos geométricos genéricos; LOD 300 o custo é calculado nas dimensões e especificações precisas dos materiais; LOD 400 o custo é calculado em preços confirmados em propostas de fornecedores; e no LOD 500 o custo é calculado a partir do valor real gasto na obra.

Na década de 2010 as aplicações IPV passaram a ser capazes de se integrar com modelos BIM, dando a capacidade do designer de construir algoritmos visuais capazes de receber e enviar informações BIM. Nesta estrutura é possível construir os críticos artificiais idealizados por Mitchell de maneira que um usuário menos especialista seja capaz de desenvolver.

O paradigma computacional atual da performance é o da modelagem paramétrica, e tem maior potencial se vinculado a modelos BIM. Em ampla revisão de literatura Álvares, Bernal e Cáceres (2020) apontaram que “desde 2010’s análises paramétricas emergem da convergência entre softwares de simulação e tecnologias de modelagem paramétrica”. Rahmani Asl, Zarrinmehr, Bergin, e Yan (2015) desenvolveram um *framework* com base BIM para otimização de performance chamado BPOpt, e justificaram sua estrutura apontando que a complexidade de um modelo de construção gera uma grande demanda de “utilizar e integrar ferramentas avançadas de modelagem e simulação, dentre as quais o BIM, a modelagem paramétrica, simulações com base na nuvem, algoritmos de otimização, bem como outras interfaces que facilitem as variáveis de decisão e objetivos de design” (e).

Em 2018 Juliano Silva desenvolveu uma ferramenta BIM-IPV que analisa critérios de desempenho ambiental a partir de normas, e dá ao designer maior poder de decisão, que em suas palavras, aumenta as habilidades intelectuais do usuário.

O autor argumenta que “as etapas de cálculo, simulações térmicas, lumínicas e acústicas, verificações de desempenho, normatização (*codechecking*) (f) são automatizáveis, pois envolvem características de componentes e materiais, relações semânticas entre tais componentes e, principalmente, regras ou etapas bem definidas, diferentemente da concepção, que dificilmente é programável”. Dessa maneira, a literatura explora majoritariamente as questões de performance voltadas para aspectos quantitativos e tangíveis, havendo ainda lacuna para análise de fatores intangíveis, como o cultural e o social. Nesse sentido, como já antes mencionado, Mitchell (1990) aponta que os sistemas de avaliação existentes tem foco extremamente fechado, sendo necessária ampliação para base ampla (g) de conhecimento que considere outros aspectos do design.

Na temática da performance e otimização dos edifícios há hoje diferentes abordagens computacionais que diferem no grau de automação e autonomia que o *feedback* computadorizado tem sobre as instâncias. No que foi exposto até aqui, compreende-se que o processo de otimização contém medição, avaliação e modificação, e a literatura hoje já apresenta modelos capazes de automatizá-las. Parte dos autores contemporâneos trazem modelos capazes de generativamente criar alternativas de design, avaliá-las e apontar dentre elas as melhores, deslocando o papel do designer para um gestor do processo. Outros autores apontam as ferramentas de design computacional como uma criatividade auxiliada por computador (h), onde as capacidades do designer são aumentadas pela máquina, mas a criatividade é realizada pelo designer (Gu, Ning, e Peiman, 2021).

A criatividade do designer acompanha o desafio de tomar decisões rápidas, e simplificadas, e o uso de ferramentas digitais deve auxiliar esse processo (Radford, 2003). Dessa maneira, o processo de design ter *feedback* em tempo real (i) de diferentes aspectos performáticos pode ampliar o processo de criação, e explorar os limites do campo de possibilidades de projeto (Shea, 2008 apud Kolarevic, 2014).

Em conclusão, a emergência de tecnologias computacionais aumentaram a capacidade de abordar a complexidade da questão da performance das edificações, que hoje acontece por meio de modelos paramétricos integrados, estruturados como mecanismos de *feedback*, nos quais a informação da edificação tem como padrão tecnológico mais atual os modelos BIM, e há uma lacuna na análise de performance de base ampla, voltada para todas as etapas de design, principalmente as iniciais.

Abaixo há uma tabela que sintetiza o problema conceitual, sistematizado pelos três focos da busca da literatura listados abaixo:

- (1) quais estruturas computacionais melhor podem implementar um sistema de análise de performance;
- (2) quais características dos modelos atuais;
- (3) quais as lacunas a serem exploradas.

Tabela 2 - Delimitação conceitual da ferramenta a partir de revisão de literatura.

id	delimitação	foco
a	mecanismos que possibilitem a análise dos aspectos de performance no paradigma de projeto do BIM	1
b	interoperabilidade, para que cada disciplina utilize modelo de base única	2
c	“performance appraisal aids” de baixa resolução, capazes de serem alimentados com modelos de baixo nível de desenvolvimento e darem resultados úteis para a tomada de decisão em design	3
d	avaliação em cada LOD, descrevendo indicadores por etapa de projeto por LOD	3
e	a modelagem paramétrica, simulações com base na nuvem, algoritmos de otimização, bem como outras interfaces que facilitem as variáveis de decisão e objetivos de design	1
f	verificações de normatização (<i>code checking</i>)	2
g	ampliação nos aspectos do design considerados na análise de performance, ampliando a base de conhecimento utilizada para a análise e temáticas de resultado (econômico, social, ambiental, etc)	3
h	criatividade auxiliada por computador, onde as capacidades do designer são aumentadas pela máquina, mas a criatividade é realizada pelo designer	2
i	design receber <i>feedback</i> em tempo real de diferentes aspectos performáticos	3

Fonte - Autor, 2022.

A partir da delimitação conceitual, o próximo capítulo do trabalho apresenta o escopo do *framework*, qual a estrutura computacional, quais os papéis dos usuários, quais as ferramentas desenvolvidas, e qual o *workflow* implementado.

4. DESIGN DO *FRAMEWORK*

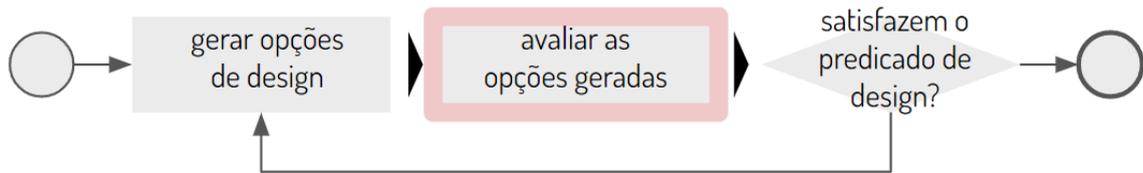
No capítulo anterior foi abordado o estado atual da análise de performance em edifícios, quais são as principais ferramentas, e a indicação de problemas apontados pela literatura. A partir disso, o capítulo atual descreve o *framework* computacional proposto no trabalho, apontando quais sistemas serão utilizados, qual o fluxo de informações e quais ferramentas foram desenvolvidas para o usuário atingir seu objetivo. No capítulo seguinte será demonstrada a implementação do *framework* proposto utilizando a tipologia de Medicina Diagnóstica.

4.1. O QUE É?

A atividade de projeto é composta por um mecanismo generativo que cria as opções de design, e um mecanismo de teste que avalia se os resultados são satisfatórios para então fazer a tomada de decisão (Mitchell, 1990). Tais mecanismos podem variar em nível de computadorização e automação, podendo ser operados por um humano designer integralmente, podendo ser auxiliados por computador, ou ainda totalmente automatizados (Gu, 2021). O *framework* proposto se propõe a avançar no mecanismo de teste, automatizando a leitura, medição e avaliação de indicadores de performance nos edifícios gerados pelo designer. Na estrutura proposta o mecanismo de geração é a atividade projetual do usuário, no qual toda a criatividade cabe ao humano, e o *framework* proposto auxilia o processo criativo por meio do *feedback* avaliativo. O presente trabalho é, portanto, a computadorização do mecanismo de avaliação definido por Mitchell (1990), e ilustrado na figura 5.

O papel proposto aqui para as ferramentas digitais desenvolvidas é de estabelecer um processo de co-criatividade computacional (Gu, 2021), no qual as decisões e alterações do artefato cabem ao designer, e a máquina presta apoio. O objetivo do sistema proposto é ampliar a capacidade do usuário de tomar decisões por meio da análise de performance em tempo real, de maneira que a atividade de projeto seja suportada por *feedback* digital de performance. Cabe ao sistema apontar visualmente se a solução de design proposta atinge os objetivos quantitativos definidos para os indicadores. A definição de quais aspectos serão avaliados busca indicadores coerentes com o contexto de projeto, a tipologia, e os objetivos específicos dos *stakeholders*.

Figura 5 - Etapas do processo de design, com destaque para a etapa focada no trabalho, na qual a computadorização é feita por meio da implementação de ferramenta automatizada de avaliação.



Fonte - Adaptado de Mitchell, 1990.

Automatizar a atividade criativa de geração de opções de design não é a etapa automatizada no trabalho, muito embora seja temática muito importante no debate contemporâneo. O foco da implementação computacional do trabalho é no processo de avaliação das opções geradas. O *framework* proposto consiste em um sistema de análise de performance com *feedback* em tempo real, no qual variados indicadores de distintas disciplinas podem ser visualizados pelo usuário para monitorar a qualidade do design, e assim ampliar sua capacidade de tomar decisões. O sistema computacional presta suporte informacional à criatividade e à tomada de decisão do projetista.

4.2. INTERFACE COMPUTACIONAL

A estrutura do *framework* baseia-se na tríade estabelecida entre o usuário, a interface BIM (Building Information Model) e a interface IPV (interface de programação visual), tomando de base para essa estrutura os ambientes digitais apontados por Rahmani Asl, Zarrinmehr, Bergin, e Yan (2015), e Silva (2018).

Optou-se por utilizar o BIM como ferramenta de representação do edifício, cumprindo papel central no *framework*: é a interface na qual o usuário modela o design, e é de onde serão extraídos os dados para a análise de performance. É o ambiente computacional em que são geridos os dados da edificação, desde inputs geométricos, até informações e atributos agregados aos elementos, necessários para análises específicas. Utilizar o BIM garante informações importantes que a análise de performance necessita, de maneira que o processo de inserir os dados em uma interface de simulação de performance fica mais rápido (Kumar, 2008 *apud*

Rahmani Asl et al, 2015). No *framework* proposto, toda a atividade de geração do projeto é feita manualmente pelo usuário na interface BIM, e esses dados são vinculados à IPV para análise de performance, sistema que fornece o *feedback*, para então no BIM serem feitos os ajustes decididos.

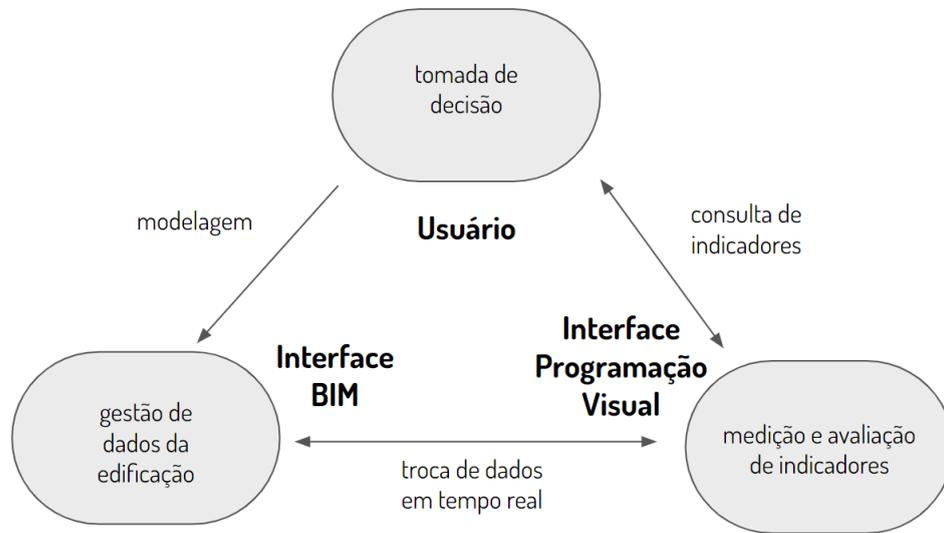
A análise de performance da construção (*Building Performance Analysis*, BPA, conforme Jin, 2019) acontece na IPV por meio de módulos de medição e avaliação de indicadores, alimentados de dados da interface BIM. Na IPV o usuário vincula o modelo BIM com módulos de análise, que trocam de dados em tempo real de maneira que o usuário pode modificar a edificação, e os resultados das medições e avaliações são atualizados simultaneamente. O designer lança mão do sistema proposto para ampliar sua capacidade de tomada de decisão, pois o *feedback* fornece base informacional direcionada para sua demanda.

A escolha da IPV como ambiente para implementação dos módulos de análise de performance mencionados surge para simplificar ao usuário designer a utilização e o desenvolvimento de aplicações específicas para o contexto de seu projeto. A programação visual permite que o usuário possa personalizar e automatizar tarefas sem a necessidade de *scripting*, aumentando a capacidade do designer de manipular os dados e tomar decisões (Lima, 2018). No *framework* do trabalho os módulos de análise são desenvolvidos na linguagem da IPV para serem vinculados com o modelo BIM e monitorar os indicadores em tempo real.

A linguagem IPV é também o ambiente que as representações visuais dos resultados da avaliação são implementadas. São programadas geometrias, textos, legendas, escalas cromáticas que fornecem informações ao usuário, na forma de gráficos e plantas esquemáticas.

No diagrama abaixo está sintetizada a estrutura do *framework*, na qual o usuário centraliza a tomada de decisão. Faz isso manuseando o modelo BIM, que troca dados em tempo real com a IPV. Nela é realizada a análise de performance por meio de módulos *queries*, que dão *feedback* ao usuário sobre a qualidade do design, auxiliando na tomada de decisão.

Figura 6 - Diagrama com estrutura computacional proposta.



Fonte - Autor, 2023.

4.3. USUÁRIOS E PAPÉIS

Para implementação do *framework* são necessários dois papéis: o desenvolvedor, responsável por programar os módulos de medição e avaliação, que estabelecem a BPA; e o usuário designer, responsável por projetar a edificação, e instanciar em IPV os módulos BPA criados pelo desenvolvedor, selecionados a partir das premissas iniciais de projeto (Eastman et al 2009). Os dois papéis são complementares e indissociáveis, pois é o desenvolvedor que viabiliza a computadorização da ampliação a capacidade do designer tomar decisões baseadas em performance.

O designer desempenha o papel criativo do processo de projeto, mas agora auxiliado por um aparato digital capaz de aferir valores indicadores do desempenho de sua produção. Para isso, o processo de projeto auxiliado pelo *framework* exige do designer (e demais *stakeholders*) que as características e atributos performáticos do edifício que deseja-se analisar sejam declarados ao início do projeto. Dessa maneira, ao apontar quais os indicadores que definem os predicados do design, e quais os objetivos de cada indicador, o projetista fundamenta o auxílio informacional que o sistema irá fornecer. Os *stakeholders* do projeto são fundamentais no processo de definir quais são os indicadores relevantes, e quais os valores

almeçados para cada variável, de maneira que o designer possa tomar decisões de qualidade, e dentro da viabilidade do projeto.

O projetista é o usuário que faz a tradução entre o contexto geral do projeto, seus objetivos, e restrições, para a ferramenta de avaliação. Esse procedimento é implementado por meio da tabela de valores referenciais, que serve de base para a interpretação dos valores medidos nos indicadores: os valores referência que vão indicar se um indicador está satisfatório ou não. Em outras palavras, o projetista e os *stakeholders* definem numericamente os objetivos dos indicadores em uma tabela de referência, que serve para a ferramenta fornecer o *feedback* informacional da avaliação do projeto. A partir do *feedback* o projetista pode optar por modificar o design, em ciclo que se finda quando a avaliação satisfizer os objetivos do designer e dos *stakeholders*.

Já a atividade do desenvolvedor é de implementar computacionalmente as ferramentas de avaliação e de *feedback*. Para a avaliação ele desenvolve dois tipos de módulos, um capaz de medir os valores dos indicadores, e outro capaz de avaliar se esses valores estão dentro dos objetivos estabelecidos, conforme será apresentado na próxima sessão. O desenvolvedor também cria visuais informativos, capazes de representar ao usuário a qualidade de suas decisões de design de maneira rápida e sintética.

Tabela 3 - Papéis dos usuários em cada interface computacional.

usuário	interface	papéis
designer	BIM	-decidir sobre o design -modelar a construção -sistematizar e armazenar dados da construção
designer/ stakeholder	IPV	-instanciar módulos -vincular dados BIM aos inputs dos módulos -manusear a tabela de valores referência
desenvolvedor	IPV	-criar módulos de medição de performance (IQ) -criar módulos de avaliação de performance (EM) -criar visualizações dos dados

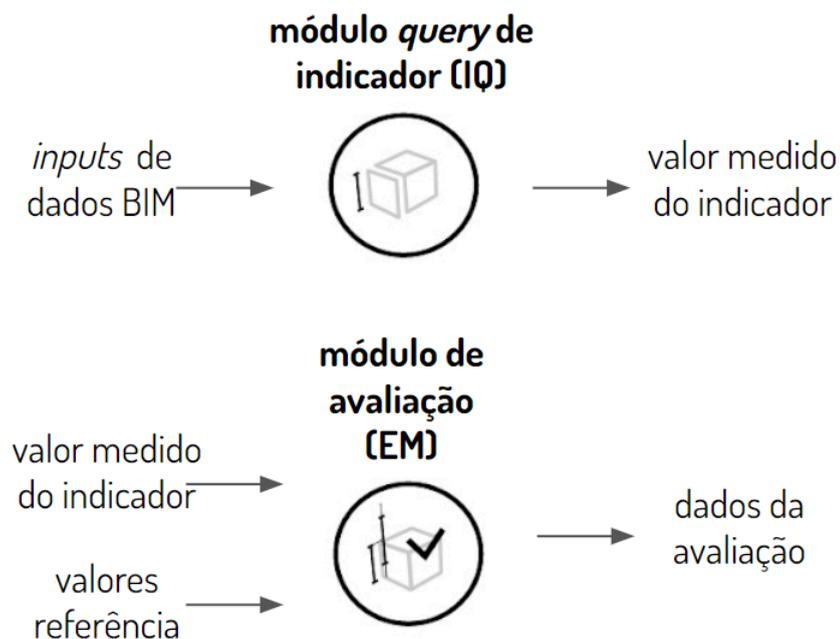
Fonte - Autor, 2022.

4.4. FERRAMENTAS

Para implementação do *framework* o designer tem à disposição dois tipos de ferramenta em IPV, que quando instanciadas e vinculadas ao modelo BIM, fornecem *feedback* em tempo real das decisões do usuário. Ambas são desenvolvidas pelos desenvolvedores antes da utilização da ferramenta pelo usuário, e seu conteúdo deve ser criado apropriadamente para o contexto de aplicação. O usuário, junto aos *stakeholders* do projeto, deve apontar ao desenvolvedor quais indicadores quer analisar. A estrutura modular da implementação foi pensada para dar flexibilidade no desenvolvimento das ferramentas e aplicações, já considerando reaproveitamento dos módulos desenvolvidos, conforme será explorado no texto.

O primeiro tipo de ferramenta são os *Indicator Query Modules (IQ)*, que consistem no motor de cálculo de indicadores. Eles irão receber dados de entrada vinculados manualmente pelo usuário, majoritariamente do BIM, e irão realizar os cálculos dos indicadores. O segundo tipo de ferramenta são os *Evaluation Modules (EM)*, responsáveis por comparar os resultados dos indicadores medidos nos IQ, com valores de referência, de maneira que possa-se qualificar esses indicadores como satisfatórios ou não.

Figura 7 - Diagrama representando *inputs* e *outputs* dos dois tipos de módulos: IQ e EM..

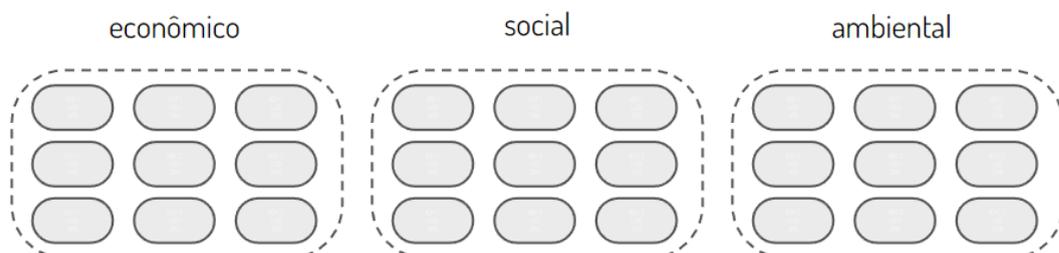


Os IQ e EM são sistematizados em *Toolboxes* (TB), que representam conjuntos de módulos organizados por temática, como por exemplo TB de indicadores econômicos, sociais ou ambientais. As TB temáticas podem ser divididas por disciplinas, onde indicadores de arquitetura, das engenharias, e demais áreas possuam um agrupamento. Elas também podem visar uma tipologia específica de arquitetura com necessidades únicas, que exigem um conjunto distinto de indicadores, como para arquitetura da saúde, ou residencial, ou ainda comercial. O agrupamento de indicadores pode ainda ser relativo aos contextos regionais, pois cada diferente contexto carrega diferentes restrições. Por instância, podemos tomar contextos climáticos ou ainda de legislação, que exigem uma TB adequada à uma cidade no nordeste brasileiro, e outra para o contexto de uma capital europeia.

A importância dos conjuntos temáticos de *Toolboxes* é de adequabilidade ao contexto do projeto (1), reutilização de TB já desenvolvidas (2), e possibilidade de desenvolvimento descentralizado, mas integrado das ferramentas (3). Há nelas a possibilidade de construir uma biblioteca crescente que alcance o interesse de diferentes *stakeholders* imobiliários, como arquitetos, engenheiros, promotores imobiliários, investidores, e ainda órgãos reguladores. Dessa maneira, por meio da modularidade da estrutura proposta no *framework*, facilita-se incorporar uma base ampla de critérios na BPA, aumentando não só a precisão da tomada de decisão, mas a quantidade de fatores que o usuário é capaz de considerar.

É importante perceber que os IQ, responsáveis apenas pela medição, são capazes de aferir valores de um determinado indicador em diferentes contextos regionais e tipológicos, mas o mesmo não se aplica aos EM, pois a base de referência muda em cada contexto. Por instância, a ferramenta digital que mede a altura de um edifício é igual em diferentes regiões, mas a afirmação de que essa altura é adequada aos predicados de projeto é distinta em cada contexto.

Figura 8 - Diagrama representando as *Toolboxes* temáticas, compostas por IQ e EM.

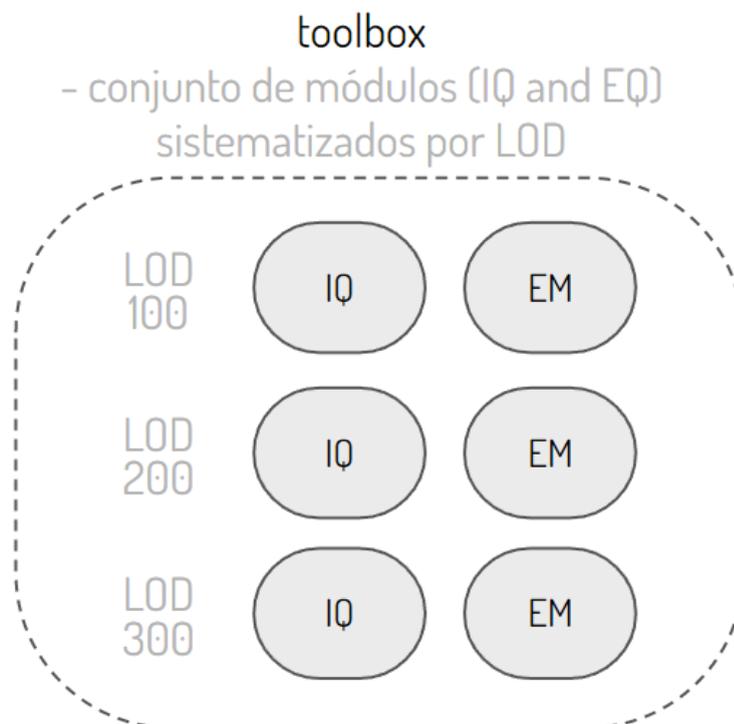


Fonte - Autor, 2022.

4.4.1. LOD

A sistematização dos módulos dentro das *Toolboxes* possui correspondência direta com o processo de projeto, onde cada etapa possui um nível de detalhamento e decisão. Maver (1971) havia descrito que o funcionamento de ferramentas BPA auxiliares ao design deveria acompanhar as diferentes etapas de projeto, estando algumas análises adequadas para etapas iniciais, e outras para estágios mais detalhados. Jin (2019) realiza uma revisão de literatura em *frameworks* BIM/BPA, e aponta que o faseamento da análise por LOD é o caminho adequado, pois cada etapa de projeto dispõe de informações distintas. Por isso, foi adotado no *framework* do trabalho a sistematização dos IQ e EM por LOD, onde cada indicador possui um motor de cálculo diferente para cada LOD (Manziona, 2013) Por instância, o indicador de custo em LOD baixo é calculado por custo/m², enquanto em LOD alto é calculado por meio de levantamentos quantitativos, e tabelas de custo. Dessa maneira, os IQ e EM devem ser programados individualmente para cada LOD, de maneira que o motor de cálculo do indicador seja adequado ao estado do modelo, e do processo de projeto.

Figura 9 - Diagrama representando uma *Toolbox* sistematizada por LOD.



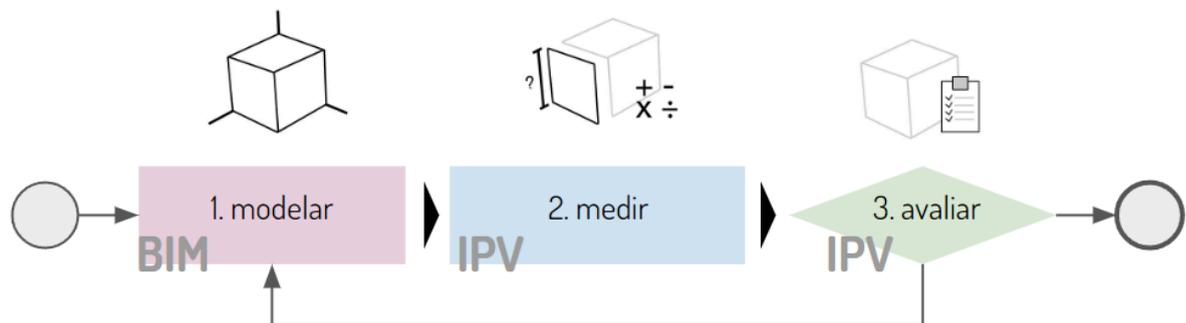
Fonte - Autor, 2022.

4.5. WORKFLOW

O *framework* está sendo proposto para enfrentar o desafio da tomada de decisão em design. A atividade de design é composta pela geração de opções, seguida pela avaliação das soluções geradas, para enfim decidir qual satisfaz os objetivos declarados no contexto de design (Mitchell, 1990).

Partindo desse fluxo, e utilizando-se das ferramentas apontadas, o *framework* tomou como referência o processo de análise de performance proposto por Thomas Maver (1971) em seu emblemático trabalho PACE (computer aided building appraisal): representação, medição, avaliação e modificação. A partir disso, o fluxo é dividido em três etapas: modelagem, medição e avaliação. Na primeira as informações relativas ao design são inseridas computadorizadas, a segunda interpreta os dados inseridos e afere a medição de valor dos indicadores, e a terceira avalia os indicadores medidos, julgando se estão satisfatórios ou não.

Figura 10 - Workflow do framework.



Fonte - Autor, adaptado de Maver (1971).

4.5.1 Modelagem

A etapa de modelagem consiste na representação computacional dos dados *inputs* para a análise de performance. O principal meio de representação do *framework* proposto é a interface BIM, servindo como integração entre o processo de design do edifício e o processo de análise. A escolha do BIM permite que o designer conceba a edificação na plataforma estado da arte para projeto de arquitetura, e que seu o fluxo de trabalho seja integrado com a IPV, responsável pela *Building Performance Analysis*, BPA (Jin, 2019). Por meio da integração da modelagem BIM com interfaces BPA, torna-se possível a inserção automática e

precisa de dados para a análise, diferente das tecnologias tradicionais, nas quais o usuário insere manualmente os dados da edificação na interface responsável pela BPA, em fluxo não muito distante do proposto por Maver (1971). A edificação representada computacionalmente torna-se a fonte primária de dados geométricos *inputs* para a BPA, e também de diversas informações que o modelo BIM é capaz de carregar, como materialidade e custo.

Na etapa de modelagem o designer deve primeiro definir qual LOD vai modelar, de maneira a saber quais elementos são necessários estarem representados para realizar as medições. O *framework* pode operar desde as fases iniciais de projeto até o detalhamento, mas para isso a modelagem tem de estar adequada à etapa corrente do projeto.

4.5.2. Medição

Com uma representação da edificação já em ambiente computacional, a etapa seguinte do *workflow* computacional é a da medição. Nesse momento, variáveis e indicadores são medidos a partir dos dados inseridos na etapa de modelagem, de maneira que sejam aferidos valores a partir do modelo. Radford (2003) define que um indicador de performance é qualquer medida quantificável que representa um requisito específico. O conjunto de indicadores muda de acordo com cada contexto, adequando-se ao que têm valor para serem explicitados quantitativamente nas distintas situações de análise. Diferentes tipologias arquitetônicas, contextos regionais, legislações, ou ainda interesses dos *stakeholders* são exemplos de características do ambiente que determinam quais indicadores têm valor para o contexto de análise. O *output* da etapa de medição é uma lista de resultados dos indicadores, frutos dos dados *input* da etapa de modelagem.

A estrutura computacional proposta utiliza-se da interoperabilidade proporcionada pelo *live link* BIM/IPV, no qual a troca de informações entre essas duas interfaces ocorre em tempo real. Dessa maneira, a interface de representação do design (BIM), e a interface que realiza a BPA (IPV), garantem ao usuário que tenha *feedback* simultâneo (Lima da Silva, 2018). O designer altera o modelo, e o sistema aponta qual o impacto nos valores dos indicadores selecionados. O processo de tomada de decisão do projeto passa a ser integrado por medições quantitativas, aumentando a acurácia das decisões na complexidade de projeto.

Na medição, o designer instancia os *Indicators Queries Modules* (IQ) na IPV, e vincula os dados do modelo BIM como *inputs*. Cada indicador possui um módulo IQ individual, classificado por LOD, de maneira que cada indicador em cada LOD tenha um IQ distinto. O usuário deve, portanto, selecionar os IQ adequados à necessidade dos *stakeholders*, ao contexto e ao estado corrente do processo de projeto. As informações necessárias para cálculos de indicadores mudam com cada etapa do design, e por isso os indicadores possuem uma sistematização por LOD. Etapas iniciais do projeto usam indicadores mais generalistas, enquanto etapas de detalhamento executivo se adequam a cálculos de indicadores mais precisos, de menor granulometria.

Tais módulos, como já apresentado, são programados pelos desenvolvedores, e postos à disposição dos designers para que os valores dos indicadores sejam levantados pela ferramenta. Dessa maneira, na IPV centraliza-se o processo de computadorização da BPA, em ambiente capaz de integrar diferentes disciplinas. Cada área desenvolve seu conjunto de módulos, com seus respectivos enfoques, formando uma biblioteca de *Toolboxes*. Essa integração e interoperabilidade vai em direção à necessidade de uma base ampla na análise de performance da construção, apontada por Mitchell (1990).

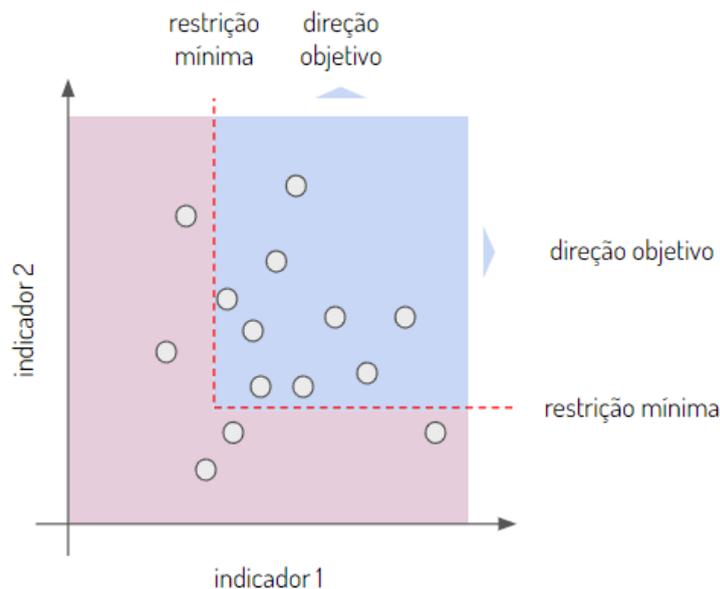
Devido à complexidade da tomada de decisão em arquitetura, o designer tem o desafio de equalizar o peso de diferentes aspectos do desempenho do edifício. Muitas decisões de projeto impactam em diferentes indicadores, e a escolha de qual priorizar é fruto da mediação do arquiteto com os *stakeholders* (Radford, 2003). Assim, uma das formas de abordar esse problema por meio do *framework* proposto é com a utilização de indicadores compostos, ou índices. Eles são IQ que usam como *input* valores resultantes de outros IQ, definindo em seu cálculo funções e pesos a esses *inputs*, de forma que o *output* do indicador composto seja uma síntese de uma variedade de fatores. A finalidade destes é criar simplificações que auxiliem a tomada de decisão, podendo resumir indicadores em índices temáticos, ou ainda propor pesos entre indicadores explorando a análise multicritério.

4.5.3. Avaliação

A ferramenta proposta visa a otimização das decisões de design, por meio do suporte informacional ao projetista. Para isso, os valores resultantes da medição dos indicadores não são suficientes para atestar se o projeto atingiu ou não as

qualidades definidas no escopo. É necessária etapa de avaliação, em que os valores medidos sejam comparados com referências. É necessário apontar quais faixas de valores são satisfatórias ao predicado inicial de design, e ainda quais valores são invioláveis para a viabilidade do projeto. Tais referências devem ser retiradas de conhecimentos já estabelecidos, por muitas vezes da própria literatura que descreve o indicador. Por meio da comparação com valores de referência é que o *framework* constrói análise conclusiva ao usuário. Antes da avaliação ainda não é possível atestar se o design está dentro das qualidades mínimas, ou seja, se a opção gerada é viável. E não apenas isso, a avaliação permite entender no campo de possibilidades de design onde se situa a opção: se é um design otimizado se aproximando aos objetivos definidos para os indicadores, ou se não tem bom desempenho. A partir do *feedback* que a avaliação proporciona o designer pode decidir alterações e avaliar seus impactos.

Figura 11 - Diagrama do espaço de opções de design, exemplificado com dois indicadores (eixos X e Y). As opções de design são os pontos, distribuídos no espaço de acordo com a medição dos indicadores. São apresentados valores restritivos e objetivos de cada indicador.



Fonte - Autor, 2023.

Portanto, no *workflow* proposto, a etapa seguinte à medição é a avaliação. Ela é realizada no *framework* por meio de *Evaluation Modules* (EM), responsáveis por comparar os resultados dos IQ com uma tabela de referência. Os EM são a

ferramenta de avaliação implementadas pelos desenvolvedores, que compara os *inputs* dos valores dos indicadores medidos da etapa de medição com os valores de referências retirados da literatura. Os resultados da avaliação dos EM são representados em interface de fácil apreensão do usuário, comunicando-o em tempo real por meio de tabelas, gráficos e visuais tridimensionais. O presente trabalho apresenta esses resultados em interface IPV, informando aos *stakeholders* a qualidade das opções de design geradas por meio de visuais.

Cada indicador (IQ) possui um EM, que realiza a comparação com dois tipos de informações da tabela de referências: a verificação se os valores mínimos/máximos de viabilidade estão atendidos (1); e a verificação de onde o indicador medido se situa da direção objetivo do indicador (2). Os valores de referência são majoritariamente retirados da literatura que os descreve, mas em ocasiões as referências dos indicadores podem necessitar de uma revisão para construção. As referências podem ser construídas por meio de processo de *benchmarking*, no qual edifícios de qualidade reconhecida por pares são medidos pelos indicadores, e utiliza-se procedimentos estatísticos para definir quais os valores referência a partir da qualidade desses exemplares.

Para o primeiro tipo de avaliação (1), as referências utilizadas para interpretação dos indicadores são de natureza restritiva. São valores que não podem ser desrespeitados, pois são necessários para a viabilidade do projeto. Dentre eles podemos mencionar normativas que apontam áreas, taxas e índices máximos e mínimos, ou ainda algum aspecto que é vital para os *stakeholders*, como a viabilidade do retorno financeiro do empreendimento. Nesses casos, a performance é abordada em um paradigma denominado de *code-checking*, explorado na literatura por Lima da Silva (2018) e Eastman, Lee, Jeong and Lee (2009). Nesses autores, a análise de performance opera testando se o modelo atende às delimitações, em ferramenta baseada em regras, provendo ao usuário rápido *feedback* se a opção de design gerada é viável dentro do respectivo campo de projeto. Por instância, tomemos um indicador simples como a altura máxima que um edifício pode atingir em determinada região devido a legislação. Se a área medida dele ultrapassar essa medida, ele é inviável. Perceba que não há nesse momento gradação qualitativa na avaliação, mas simples aferição de “viável”, e “inviável”.

O segundo tipo de avaliação (2) atribui a cada indicador um objetivo, por vezes majorar, outras minorar, ou ainda atingir um valor específico. Nesses casos a

avaliação tem natureza mais qualitativa do que restritiva, nos quais quanto mais os indicadores se aproximam dos objetivos, mais otimizado é o design.

Tomemos como exemplo a “razão custo/benefício de lucro” de um empreendimento, da disciplina de performance econômica (Radford, 2003). O autor argumenta que essa razão só é viável quando positiva, enquadrando-se na avaliação do primeiro formato. Em casos, a razão mínima viável é mais ambiciosa do que apenas ultrapassar a fronteira do positivo, estabelecendo mínimo de 0,60 de lucro excedente para viabilidade, por exemplo. Ao mesmo tempo, tal indicador tem um objetivo sempre crescente para o *stakeholder* imobiliário, se enquadrando também na avaliação do segundo formato. Para esse agente, não há restrição máxima desse valor, no qual muitas vezes o limitante de criar a arquitetura para majorar ao máximo esse indicador seja respeitar também os objetivos de outros indicadores.

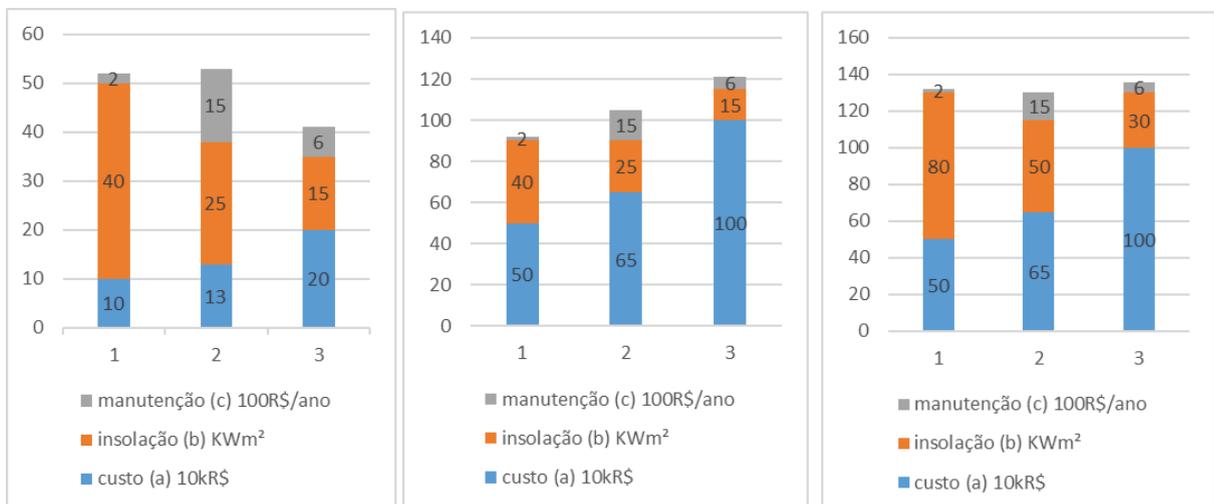
A atividade do arquiteto é, portanto, equalizar em projeto os diferentes pesos e importâncias de cada indicador, de maneira que os interesses dos *stakeholders* sejam viáveis, e otimizados. Dessa maneira, entende-se que a decisão multicritério é inerente à atividade de design, onde diferentes aspectos têm de ser considerados em uma complexa balança, para selecionar a opção de design. Para considerar esse fato, Radford (2003) aponta que uma metodologia de avaliação em design tem de ter estrutura flexível, onde os objetivos e pesos não são definidos à priori, e podem ser manuseados. A partir disso, no *framework* proposto, a avaliação multidimensional é abordada por meio de indicadores compostos, ou índices. Eles, já anteriormente comentados, consistem em indicadores calculados utilizando outros indicadores como *inputs*, onde o usuário pode definir em sua função pesos, objetivos e prioridades. Dessa maneira, pode ser realizada uma síntese da performance de cada opção do campo de design, na qual diversos indicadores são ponderados em apenas uma avaliação.

Para exemplificar, imaginemos o projeto de uma edificação no litoral nordestino brasileiro, na qual o projeto decidiu analisar três principais indicadores que tinham como objetivo minorar: (a) custo de execução, (b) carga solar e (c) custo de manutenção. Nesse contexto climático quente e úmido, deseja-se proteger do sol, principal inimigo do conforto na maior parte do ano. A primeira instância desse projeto lançou uma opção com esquadrias voltadas para a fachada poente; a segunda lançou esquadrias com segunda camada de venezianas de alumínio; e a

terceira opção lançou esquadrias com brises de concreto. Na primeira opção, o custo (a), e o custo de manutenção (c) foi o menor das três, porém a carga solar (b) foi a pior por uma grande margem. A segunda opção aumentou um pouco os custos (a,c), mas melhorou substancialmente a insolação (b). Já a terceira opção teve a menor insolação (b) e também baixo custo de manutenção (c), porém o maior custo de execução (a). Dessa maneira, a depender das prioridades definidas em projeto, cada uma das opções do campo de design melhor satisfazia.

O diagrama abaixo é um exemplo de representação da ferramenta, no qual podemos observar a distribuição dessas opções. Se dermos pesos iguais aos 3 indicadores, a terceira opção seria a melhor, conforme o primeiro gráfico. Se dermos peso cinco vezes maior ao custo, a primeira opção passa a ser a que melhor atende, conforme segundo gráfico. Já se dermos peso dobrado para a insolação, a segunda opção atende melhor, conforme terceiro gráfico.

Figura 12 - Gráficos ilustrando a tomada de decisão multicritério. São ilustrados os 3 exemplos citados no texto acima. Em cada gráfico é simulado um cenário de pesos diferentes para os indicadores, de maneira que o objetivo seja alcançado por diferentes opções em cada cenário, a depender da hierarquia dos objetivos.



Fonte - Autor, 2023.

O *framework* proposto é uma estrutura capaz de realizar avaliações de indicadores de edificações de saúde, e disponibilizar essas informações para os *stakeholders* responsáveis pela tomada de decisão. Como dito, a avaliação ocorre comparando os resultados dos indicadores com uma base de referência, mais especificamente medindo a razão entre o valor determinado e o valor medido. O

resultado da avaliação sendo 1, significa que o indicador medido está com o mesmo valor que a referência. Partindo disso, o dispositivo de *feedback* visual comunica os resultados dessa avaliação para cada indicador, utilizando esse valor da avaliação como uma variável na representação (ex: escala cromática).

A base de valores referência funciona como a interface de definição de objetivos do sistema, e os valores contidos nela são majoritariamente retirados de normativas restritivas, e literaturas que estudam as boas práticas referentes a determinados indicadores. São também nos valores referência que podem ser inseridos objetivos específicos do contexto do design analisado, declarando os valores *benchmarks* dos indicadores. A determinação dos valores alvo podem ser feitas pelos *stakeholders* que detêm experiência e subjetividade imprescindíveis para o sucesso de um projeto. Compreender se a opção de design gerada está satisfatória diz respeito não apenas a exequibilidade técnica do projeto, mas também se ela atende as necessidades e expectativas dos agentes envolvidos na concepção e posterior ocupação. O processo de declarar a base de referência é previsto na NBR 15575, ao apontar a necessidade dos níveis de desempenho definidos com o contratante ser indicada em documentação de projeto, sempre respeitando os valores mínimos normativos.

Dessa maneira, anteriormente à concepção, devem ser debatidos e explicitados os objetivos do design, para que a etapa de avaliação resulte em uma representação útil para a tomada de decisão. É importante reparar que avaliar e decidir são etapas distintas. A etapa de avaliação do processo de design é computadorizada no *framework* proposto, criando suporte informacional para a etapa seguinte do fluxo: decidir. O trabalho não sugere um mecanismo que tome a decisão sobre o design, mas informe o designer e o *stakeholder* o quão próximo dos objetivos dos indicadores o projeto está.

Não é o foco do atual trabalho desenvolver métodos de avaliação multicritério, pois na literatura há diversos modelos consolidados, como o proposto por John Gero (1985) e Mariana Lima (2016). O sistema aborda estas decisões complexas possibilitando que sejam configuradas funções multicritério por meio dos indicadores compostos, ou índices. Para criar um índice, cria-se uma fórmula com operações e pesos utilizando os indicadores medidos. A utilização de sistemas de inteligência artificial para acelerar as decisões multicritério em design vem se expandindo

(Álvares, 2020), e pode ser um caminho para a construção de modelos multicritério mais eficientes, ou seja, índices mais confiáveis.

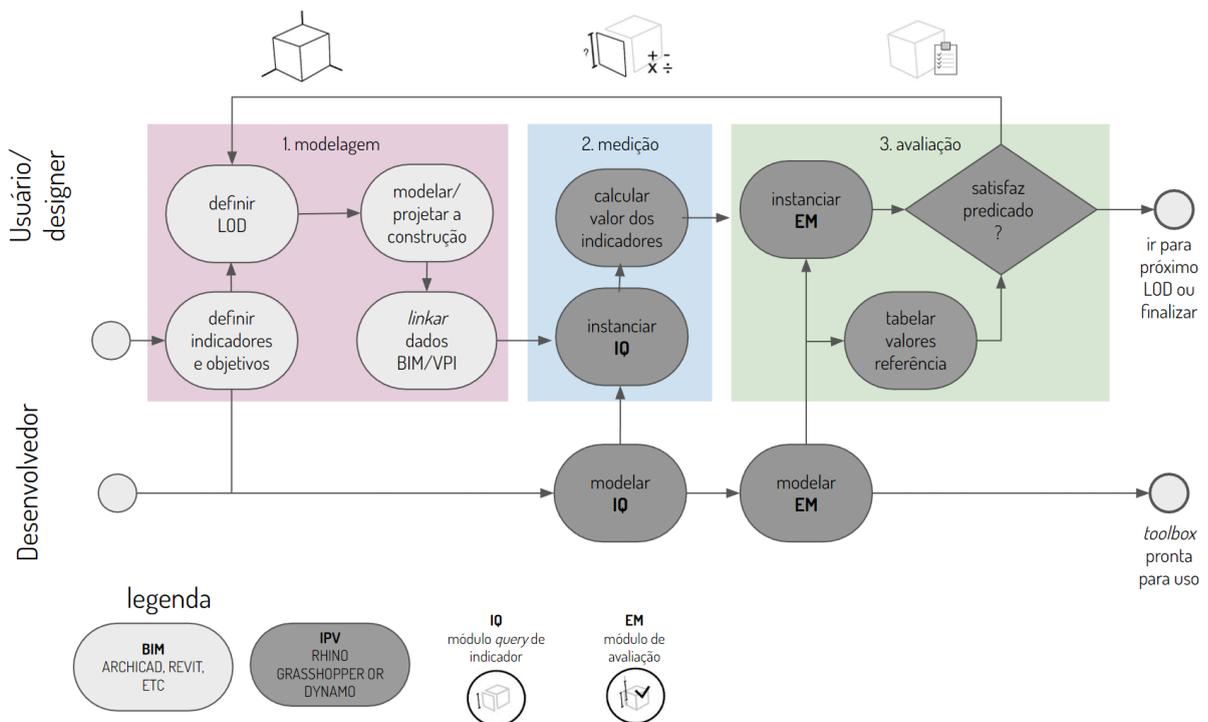
Se resgatarmos o processo de design de Mitchell (1990), o *framework* proposto só automatiza a etapa de avaliação. Nem a geração, nem a tomada de decisão são automatizadas, e ainda são operacionalizadas por um usuário humano. O processo de otimização proposto neste trabalho consiste no *feedback* visual dos resultados da avaliação ao usuário, para eventuais modificações realizadas pelo designer. É a criação humana avaliada pelo sistema, que por meio de representações informacionais suporta revisão também humana. A ênfase escolhida no trabalho é de prover ao usuário designer a interface de projeto de menor complexidade computacional, visando o alcance da comunidade de projetistas BIM.

Por isso não foi buscada a implementação de modelo automatizado de otimização, nos quais a geração de opções é paramétrica, que após criar variadas instâncias, seleciona-as automaticamente por meio de critérios de avaliação. Esse tipo de solução exige uma implementação computacional mais complexa, o que pode dificultar a inserção na rotina profissional de escritórios e projetistas.

4.6. CONCLUSÃO - SÍNTESE DO *FRAMEWORK*

O diagrama abaixo representa a síntese do processo necessário para utilizar o *framework*. Ele foi composto a partir das interfaces computacionais selecionadas, dos papéis que os usuários desempenham, das ferramentas desenvolvidas, e do fluxo de trabalho. As três etapas tem suas tarefas detalhadas, separadas em raias com ações dos dois usuários, com as respectivas interfaces computacionais indicadas em ação. Também pode ser observada a criação e utilização dos módulos desenvolvidos, de maneira que a decisão se o design atende aos predicados é suportada por ferramenta digital.

Figura 13 - Workflow detalhado do *framework*.



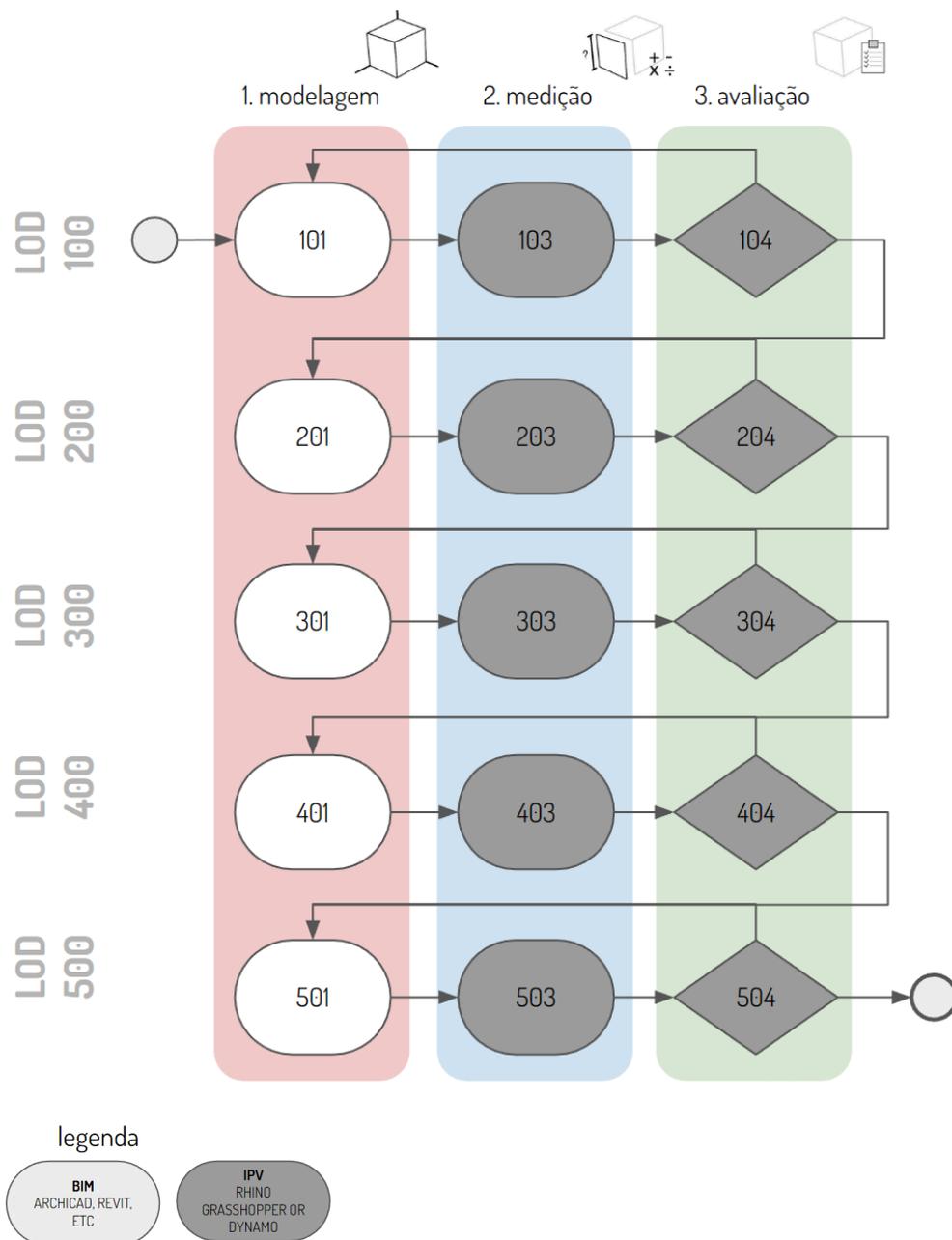
Fonte - Autor, 2022.

A tarefa final de cada usuário é extremamente importante, pois reflete os objetivos do design da ferramenta: para o usuário é decidir o fim do design com performance satisfatória; e para o desenvolvedor é dispor de *toolbox* da temática de projeto pronta para uso.

O que é constante nas tarefas iniciais e finais do usuário designer é justamente a definição da etapa de projeto corrente, a qual alinha-se com a definição de LOD das literaturas que abordam BIM. Dessa maneira, o *framework* proposto

busca proporcionar melhora no processo de tomada de decisão em todas as etapas de design/LOD. O fluxo apresentado em modelagem, medição, e avaliação pode ser aplicado em qualquer etapa de projeto. O fluxograma abaixo idealiza um fluxo de projeto onde a ferramenta, potencialmente, pode apresentar os maiores impactos nos resultados finais, pois aspectos relevantes de cada etapa de projeto podem ser elucidados com respectivos indicadores e avaliações.

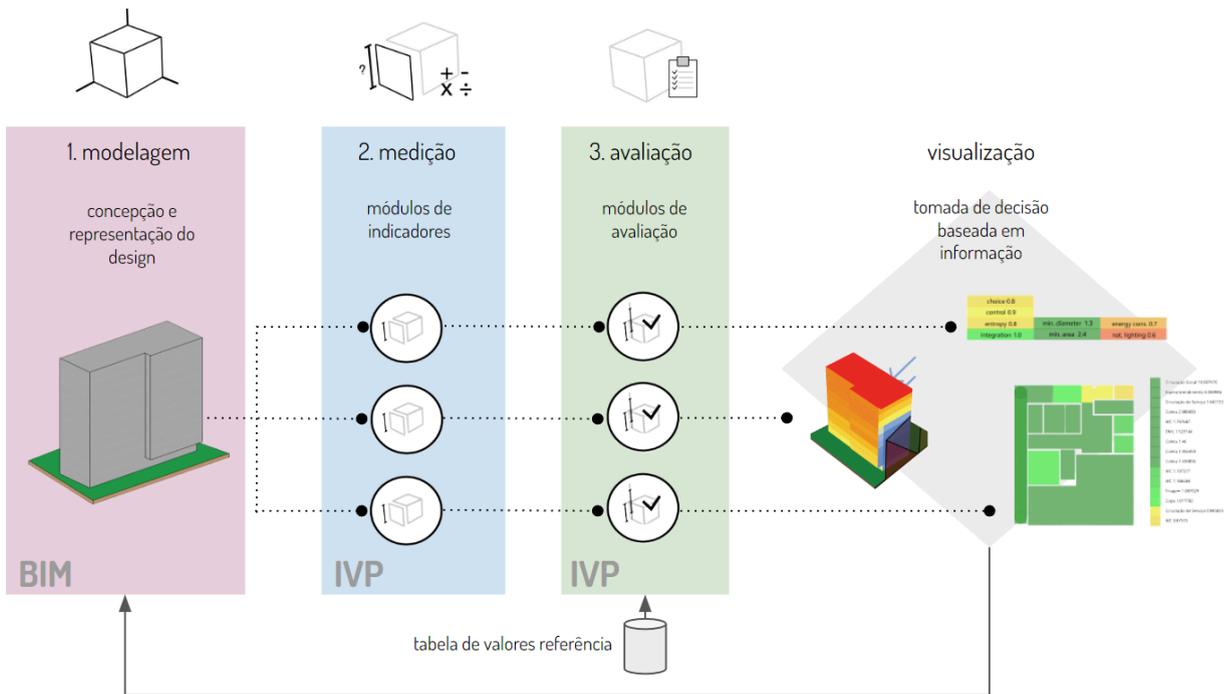
Figura 14 - Workflow de projeto em diferentes LOD.



Fonte - Autor, 2022.

Por fim, o diagrama abaixo representa uma síntese do *workflow* voltada para as interfaces computacionais utilizadas, e os recursos proporcionados pela ferramenta objeto deste trabalho.

Figura 15 - *Workflow* do *framework*, representando interfaces e ferramentas computacionais, além das visualizações de resultados.



Fonte - Autor, 2023.

A etapa inicial de modelagem em interface BIM é onde o edifício é representado, criando os dados que servem de *inputs* para a medição. A medição, em IPV, lança mão dos módulos IQ, responsáveis por dar como *outputs* os valores resultantes do cálculo de indicadores. Em seguida, esses valores são *inputs* dos EM, módulos de avaliação, nos quais valores referência oriundos de uma tabela são comparados com os valores medidos. Essa comparação gera resultado visual ao usuário, com representação em tempo real, de maneira que a análise de performance possa ser feita de maneira simplificada e útil à tomada de decisão em projeto. Os resultados representados visualmente atestam se a opção de design gerada é viável dentro das restrições de projeto definidas, e também apontam o desempenho das opções viáveis de design. Dessa maneira, o projetista pode rapidamente tomar decisões para definir se a opção que ele criou satisfaz os objetivos, e caso não, modificar o edifício. Ao modificar ele recebe *feedback*

instantâneo que o permite avaliar o impacto de sua tentativa, e seguir esse ciclo até estar satisfeito.

A modularidade foi solução encontrada para garantir a flexibilidade da estrutura computacional para as diferentes etapas de projeto, para diferentes tipologias, contextos culturais e diferentes *stakeholders*. A escolha de quais módulos lançar no sistema, ou seja, a definição de quais indicadores serão relevantes para a avaliação, e como eles serão visualizados permite que o usuário componha a ferramenta de acordo com sua necessidade. Para o framework se integrar no processo criativo, ele precisa responder aos questionamentos pertinentes ao projeto, de maneira interativa e útil. A incorporação de suporte informacional ao processo de projeto também pode ser caminho útil para o aprendizado, e sensibilização do designer, que ganha percepção de fatores intangíveis do design, uma vez que esses fatores passam a ser representados visualmente.

5. IMPLEMENTAÇÃO: MEDICINA DIAGNÓSTICA

Neste capítulo será apresentada a implementação do sistema computacional dentro da tipologia de estudo, a arquitetura da saúde, mais especificamente a medicina diagnóstica. Para isso, três temáticas de estudo foram elencadas para guiar a abordagem dos indicadores: a configuração espacial, a qualidade do ambiente interno (IEQ) e as normas e códigos vigentes. Para cada uma das temáticas é apresentada literatura que justifica sua aplicação no projeto, bem como suas bases teóricas. Para cada uma delas serão elencados os indicadores, apresentando individualmente porquê analisá-lo, seu modelo de cálculo, suas fontes de dados e o que ele agrega para a análise. Por fim, será apresentada para cada indicador qual a base de referência utilizada para comparação com os valores medidos, de maneira a avaliar se os resultados estão satisfatórios ou não.

No diagrama que segue é possível visualizar diversos indicadores mapeados e respectivos temas, e classificações das respectivas literaturas. É importante apontar que o recorte mostrado na árvore é um conjunto que se mostrou importante para o caso de estudo a partir da pesquisa em literatura. Não obstante, diversas outras temáticas e diversos outros indicadores podem ser considerados de acordo com os contextos de projeto. Para determinado contexto, avaliar o custo da construção e a sustentabilidade envolvida na aquisição dos materiais construtivos podem ser os temas mais importantes. A estrutura sugerida no *framework* é flexível para servir aos diferentes contextos, pois organiza um fluxo de informações modular, no qual os indicadores e as bases de referência são desenvolvidos para atender o propósito do projeto. Portanto, o capítulo irá apresentar os módulos de indicadores pertencentes à Toolbox desenvolvida para edificações da saúde.

Tabela 4 - Mapeamento de indicadores relevantes para a tipologia.

temática	campo	indicador
configuração espacial	<i>space syntax</i>	integração entropia controle escolha
IEQ	conforto térmico	temperatura ambiente umidade do ar consumo energético para conforto
IEQ	conforto acústico	nível de ruído tempo de reverberação
IEQ	conforto visual	iluminação natural iluminação total consumo energético para conforto
IEQ	qualidade do ar interno	quantidade de trocas de ar nível de poluentes
normas e códigos	RDC	programa mínimo vizinhança obrigatória área mínima instalações mínimas
normas e códigos	NBR 9050	largura mínima de corredores largura mínima de portas inclinação de rampas
normas e códigos	código de obras	círculo inscrito mínimo área mínima de aberturas

Fonte - Autor, 2023.

5.1. CONFIGURAÇÃO ESPACIAL - *SPACE SYNTAX*

Em edifícios complexos, como hospitais, problemas de configuração podem resultar em circulações ineficientes, custos elevados de manutenção, disfunção econômica e questões operacionais que impactam na segurança (Nourian, 2016). Na tipologia de estudo, diferentes fatores da construção definidos em projeto afetam a saúde e satisfação dos ocupantes, entre os quais estão os fluxos e composição funcional/espacial (Nimlyat, Kandar, 2015). Para lidar com esse desafio, Nourian (2016) propõe a adoção de abordagens que se concentrem em expressar de forma clara as configurações dos edifícios, utilizando um design e análise integrados, com *layouts* que incorporam elementos arquitetônicos sistêmicos, genéricos e intuitivos.

A *Space Syntax* aborda aspectos da performance do edifício do ponto de vista programático e social. Ela o faz não focando em qualidades morfológicas, mas sim em relações espaciais, conforme apontado por Hillier (citado em Nourian, 2016)). Dessa maneira, é mais importante para essa abordagem as relações de vizinhança e centralidade, por exemplo, do que as relações dimensionais. Busca-se analisar como os ambientes se organizam uns com os outros, explorando o quão isolado ou conectado é um ambiente, ou verificando a dificuldade de acesso de outro. Dessa maneira, o programa de arquitetura da saúde pode ser abordado com um conjunto de indicadores capaz de descrever a natureza de cada ambiente: uns idealmente mais restritos, outros idealmente mais integrados. É importante também considerar que os modelos de análise da *Space Syntax* não são simulações e previsões de como as pessoas irão ocupar, circular e se comportar nos edifícios (Nourian, 2016).

A fim de analisar a estrutura configuracional de edifícios complexos, Nourian (2016) implementou computacionalmente modelos oriundos da *Space Syntax*, capazes de analisar em tempo real os indicadores. Nessa abordagem, a topologia dos ambientes é descrita através de grafos, e suas características são mensuradas por meio de indicadores. Os grafos são representações das relações topológicas, onde cada nó é um ambiente, e cada linha é uma conexão que liga dois ambientes. Essa abordagem representa uma primeira e relevante maneira de avaliar edificações no âmbito da saúde.

Dentro da abordagem da *Space Syntax*, foram escolhidos quatro indicadores: Integração, Entropia, Controle e Escolha (Nourian, 2016). O motivo da escolha foi a

existência de implementações computacionais validadas de mecanismos de medição desses indicadores, permitindo que dentre as limitações da pesquisa fosse possível implementar indicadores das distintas temáticas. A Integração é uma medida de centralidade que indica a probabilidade de um espaço ser considerado privado ou compartilhado. Já a Entropia descreve a dificuldade de alcançar outros espaços a partir de um espaço específico, ou seja, quanto maior a Entropia, mais difícil é acessar outros espaços a partir deste local. O indicador Controle representa a força da conexão de um vértice do grafo com os demais, e a Escolha revela a frequência com que um nó aparece nos caminhos mais curtos com outros nós.

Tabela 5 - Mapeamento de indicadores da *Space Syntax*.

nome	temática	referência bibliográfica	o que é
Integração	sintaxe espacial	(Hillier, B., Hanson, J., 1984) retirado de (Nourian, 2016)	medida de centralidade que indica quão provável é um espaço de ser privado ou compartilhado
Entropia	sintaxe espacial	(Turner, 2007) (baseado na entropia da informação de (Shannon, C.E. e Weaver, W., 1949)) retirado de (Nourian, 2016)	descreve a dificuldade de ir para outros espaços a partir de um espaço específico. Ou seja, quanto maior a entropia, mais difícil é chegar em outros espaços a partir desse espaço.
Controle	sintaxe espacial	(Hillier, B., Burdett, R., Peponis, J., Penn, A., 1987) retirado de (Nourian, 2016)	indica quão fortemente um vértice do grafo é ligado aos outros de uma "maneira superior".
Escolha	sintaxe espacial	(Freeman, 1977) retirado de (Nourian, 2016)	mostra quantas vezes um nó aparece nos caminhos mais curtos com outros nós, para indicar a importância de um vértice na configuração. Baseia-se na centralidade.

Fonte - Autor, 2023.

Para realizar a medição desses indicadores, utilizou-se o plugin SYNTACTIC para Grasshopper, desenvolvido por Nourian (2016), que calcula esses indicadores com base em um grafo da configuração espacial. As informações necessárias para calcular os indicadores dessa temática são os ambientes, e a listagem das relações entre eles. Os ambientes são modelados utilizando zonas da interface BIM, e as

conexões entre eles são listadas por escrito em uma caixa de texto na IPV. Utilizando esses dois inputs, é desenhado um grafo topográfico, e a partir dele os indicadores são medidos utilizando o plugin. As informações necessárias para calcular esse conjunto temático de indicadores são de natureza topológica, não sendo importante aqui as dimensões métricas dos ambientes, mas sim a listagem de ambientes e suas relações. Dessa maneira, esse conjunto de indicadores pode ser aplicado desde as etapas iniciais do projeto, podendo iniciar desde os LODs 100 ou 200, onde há geometrias preliminares sem medidas definidas.

Utilizar esses indicadores desde as fases iniciais pode ajudar a respeitar a topologia adequada dos ambientes. Com eles pode ser verificado se um ambiente com papel de conexão e distribuição está de fato conectado e integrado; ou ainda se um ambiente que exige isolamento por algum motivo de segurança seja de pouca conectividade.

Figura 16 - Ilustração simplificada da modelagem necessária para a medição dos indicadores da sintaxe espacial implementados.



Fonte - Autor, 2023.

A fim de avaliar se os indicadores medidos estão dentro de padrões satisfatórios, foi criada uma base de referência que estabelece os valores esperados para cada indicador em cada ambiente (ver apêndice). Não foi encontrada na literatura base de referência para avaliação dos indicadores da sintaxe espacial da tipologia, e por isso decidiu-se construir essa base. Uma amostragem de 4 edifícios da tipologia foram modelados e tiveram seus valores de indicadores medidos, formando um conjunto de dados cuja média resultou nos valores de referência.

Não se pode deixar de comentar que a avaliação e interpretação dos indicadores dessa temática pode ser um problema, pois não descrevem aspectos

tangíveis, mas sim subjetivos. Estes indicadores são ferramentas para explorar a análise configuracional, como Nourian (2016) aponta. O presente trabalho avança com uma tentativa de estabelecer uma base de referência “ótima” para o programa de estudo, considerando edifícios modelo.

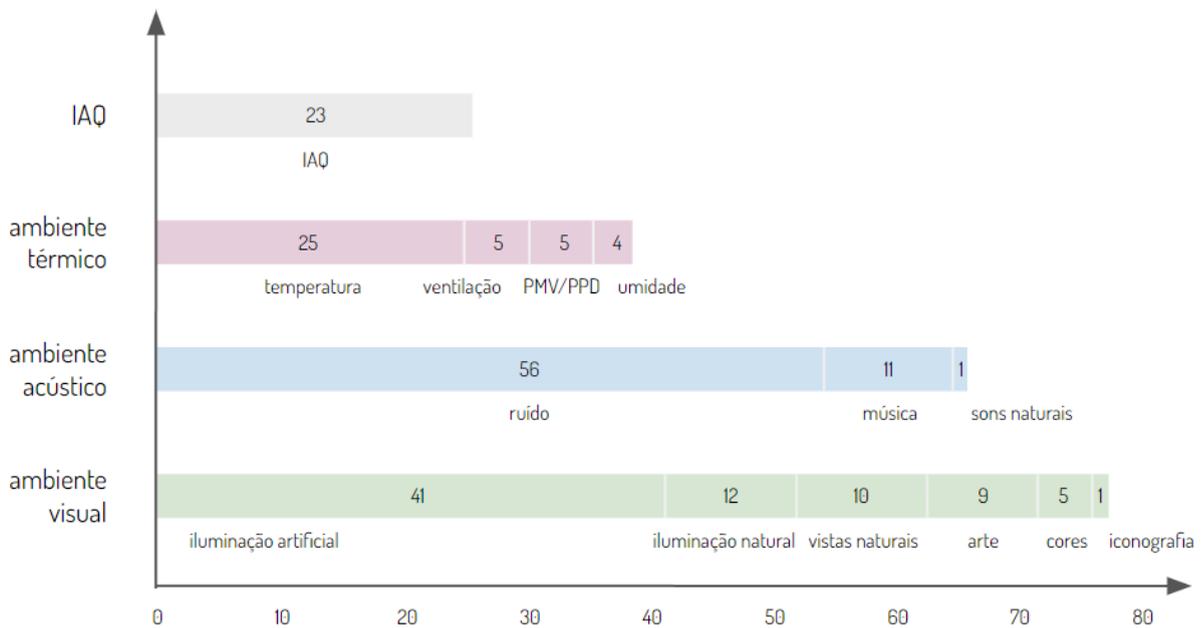
5.2. IEQ

Outro conjunto de características essenciais para o bom funcionamento de edificações de saúde são os que impactam na Qualidade Ambiental Interna (IEQ). Esses aspectos formam uma interface entre o edifício e os usuários, fazendo com que as qualidades físicas do ambiente sejam percebidas para constituir a ideia de conforto (Nimlyat, Kandar, 2015). Os edifícios são concebidos e construídos para serem utilizados, operados e habitados por pessoas, e, portanto, as necessidades dos ocupantes devem ser consideradas como um requisito fundamental para o seu conforto. Dessa forma, é imprescindível que tanto os planejadores quanto os gestores do ambiente construído se empenhem em manter uma IEQ mais satisfatória nos edifícios (Nimlyat, Kandar, 2015). É importante considerar que a “luz natural, o ar interno despoluído, e boa ventilação são essenciais para melhorar o ambiente em edificações de saúde” (Alzoubi, Al-Rqaibat, Bataineh, 2010).

Nesse contexto, a incorporação de indicadores que avaliem a IEQ nos ciclos de análise e avaliação revela-se de grande importância para o ciclo de projeto. Portanto, métricas quantitativas capazes de explicitar qualidades ambientais são úteis para guiar objetivamente um projeto na direção do conforto dos seus usuários.

A literatura aborda quatro fatores de IEQ: conforto visual, conforto térmico, conforto acústico e qualidade do ar interno (IAQ) (Nimlyat, Kandar, 2015). Cada uma dessas categorias impacta de diferentes formas os usuários das edificações de saúde, que são desde os pacientes, às equipes de trabalho. Existe uma larga literatura que estuda diferentes aspectos da edificação em cada fator, apontando problemas e estratégias de projeto e pós-ocupação para melhorar a qualidade do ambiente interno. O gráfico abaixo traz alguns dos aspectos de cada categoria e sua frequência bibliográfica, a partir da revisão de literatura apresentada por Shen, Zhang, Li, Qu, Zhao, Kong, Jia (2023).

Figura 17 - Fatores do ambiente interno, e sua frequência encontrada em revisão na literatura. Na imagem é possível observar os principais fatores que devem ser considerados.



Fonte - Shen, Zhang, Li, Qu, Zhao, Kong, Jia, 2023.

Os temas IEQ no Brasil são abordados em uma série de normativas, que listam indicadores semelhantes aos encontrados na literatura apresentada. A NBR 15575 é uma sistematização de 232 normas, e nela dentro da classificação temática de Habitabilidade estão listados requisitos dos usuários correlatos às classes IEQ: saúde, higiene, qualidade do ar; desempenho térmico; desempenho acústico; e desempenho lumínico. Esta normativa, no entanto, é voltada para projetos residenciais, o que não impede de os mesmo indicadores serem utilizados, apesar de programa diferente, pois ajustando a referência de avaliação para a tipologia de estudo, os indicadores continuam pertinentes. A simulação computacional para desempenho é indicada em três dos indicadores da NBR 15575: iluminação natural, adequação de paredes externas e isolamento térmica da cobertura. O trabalho inclui os indicadores normativos referentes a fatores de desempenho ambiental dentro da temática IEQ, e reserva a temática de Normas e Códigos para aspectos espaciais normativos, como área mínima e programa mínimo.

A abordagem de design integrada com a preocupação nos fatores de IEQ tem grande potencial para satisfazer os usuários pós-ocupação (Nimlyat, Kandar, 2015). Para implementar a análise IEQ no design, há na literatura um conjunto de indicadores capazes de quantificar qualidades para os fatores ambientais. Boa parte

dos indicadores são baseados em fenômenos físicos e para obter seus resultados durante o design devem-se realizar simulações. Mas não obstante, há na literatura estratégias de design que apontam diretrizes arquitetônicas com consequências no conforto, mas que se valem de padrões geométricos ou escolhas técnicas/materiais, como a permeabilidade visual, decoração ou a presença de cortinas por exemplo (Shen, Zhang, Li, Qu, Zhao, Kong, Jia, 2023). Na tabela abaixo podemos observar indicadores para cada um dos fatores ambientais retirados da literatura e de normativas que abordam qualidade do ambiente interno:

Tabela 6 - Mapeamento de indicadores IEQ.

nome	temática	referência bibliográfica	o que é
Temperatura ambiente	conforto térmico	Khodakarami em Nimlyat (2015)	medida em graus de temperatura
Umidade do ar	conforto térmico	Clements-Croome em Nimlyat (2015)	medida relativa (%) da quantidade de água no ar até condensar
Consumo energético*	conforto térmico	Ncube em Nimlyat (2015)	medida do consumo energético relativo a área (kWh/m ²)
Adequação de paredes externas	conforto térmico	NBR 15575 (2013)	Capacidade térmica mínima de paredes externas
Adequação de paredes externas	conforto térmico	NBR 15575 (2013)	Transmitância térmica máxima das paredes externas
Isolação térmica da cobertura	conforto térmico	NBR 15575 (2013)	Transmitância térmica máxima da cobertura máxima
Aberturas para ventilação	conforto térmico	NBR 15575 (2013)	Áreas de aberturas para ventilação mínimas em ambientes de permanência prolongada (salas e dormitórios) conforme legislação
Nível de ruído	conforto acústico	Sadek em Nimlyat (2015) e NBR 15575	medida da amplitude do ruído em dB
Tempo de reverberação	conforto acústico	Locke & Pope (2017)	tempo de reverberação de um ambiente em segundos

Isolação acústica de paredes externas	conforto acústico	NBR 15575 (2013)	desempenho acústico das vedações externas
Isolação acústica entre ambientes	conforto acústico	NBR 15575 (2013)	isolação ao ruído aéreo entre pisos e paredes internas
Nível de ruído de impacto em coberturas acessíveis de uso coletivo	conforto acústico	NBR 15575 (2013)	nível de ruído de impacto em coberturas acessíveis de uso coletivo
Iluminação natural*	conforto visual	Chiang & Lai em Nimlyat (2015)	medida em Lux da iluminação natural
Iluminação total	conforto visual	Chiang & Lai em Nimlyat (2015)	medida em Lux da iluminação total, incluindo artificial
Consumo energético*	conforto visual	Ncube em Nimlyat (2015)	medida do consumo energético relativo a área (kWh/m ²)
Quantidade de trocas de ar	qualidade do ar interno	Chiang & Lai em Nimlyat (2015)	quantidade de vezes que o volume total de ar de um ambiente é trocado por um período de tempo
Nível de poluentes	qualidade do ar interno	Chiang & Lai em Nimlyat (2015)	medida em escala que qualifica o ar a partir da quantidade e gravidade dos poluentes

*Os indicadores marcados foram implementados computacionalmente no sistema.

Fonte - Autor, 2023.

A variedade de indicadores torna a avaliação multicritério dos indicadores IEQ um desafio, principalmente para definir quais são os fatores mais importantes. Essa ponderação é realizada de distintas maneiras na literatura, na qual encontram-se hierarquias de quais fatores de conforto mais impactam na satisfação do usuário. Esses diferentes modelos são úteis para interpretação dos resultados da avaliação dos indicadores frente aos objetivos, pois podem ser subsídio para a tomada de decisão a partir de prioridades (ver tabela 7).

Tabela 7 - Esquemas de peso para diferentes parâmetros IEQ.

referência	conforto térmico	conforto acústico	conforto visual	qualidade do ar
Cao et al. (2012)	0,38	0,27	0,21	0,14
Ncube and Riffat (2012)	0,30	0,18	0,16	0,36
Wong et al. (2008)	0,31	0,24	0,19	0,25
Yoon (2008)	0,26	0,23	0,22	0,29

Fonte - Nimlyat, Kandar, 2015.

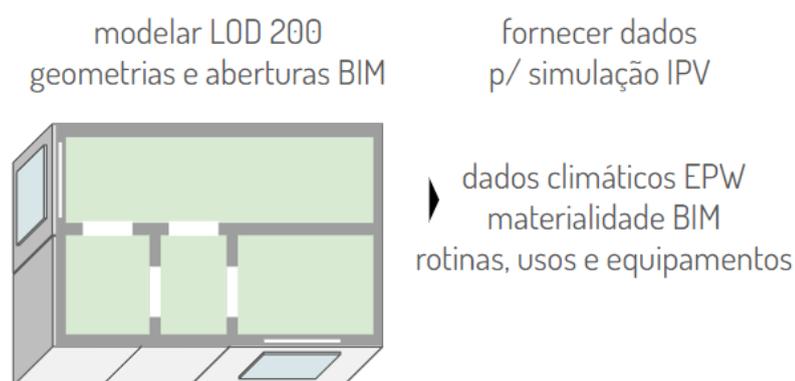
Dentro do escopo da Qualidade Ambiental Interna (IEQ), o trabalho implementou computacionalmente dois indicadores fundamentais relacionados ao conforto visual e térmico: iluminação natural e consumo energético para o conforto. Através de uma extensa revisão bibliográfica, Shen, Zhang, Li, Qu, Zhao, Kong, Jia (2023) concluíram que a presença de luz natural e vistas benéficas pode proporcionar relaxamento aos pacientes, reduzir o estresse e a depressão, além de encurtar as estadias hospitalares e melhorar a satisfação. Para os funcionários, tais benefícios incluem a redução de erros, estresse, absenteísmo e fadiga, além de contribuir para melhorias no desempenho, atitude e satisfação no trabalho.

A fim de avaliar o conforto térmico, optou-se por medir o consumo energético utilizado pelos sistemas mecânicos de conforto, o que também foi aplicado para avaliar o consumo energético para o conforto visual/iluminação. Optou-se por esse caminho, pois a performance IEQ tem uma grande influência no consumo energético (Nimlyat, Kandar, 2015) e parte-se do pressuposto que os ambientes estarão sempre em conforto, mesmo que através de sistemas mecânicos.

Os indicadores foram implementados utilizando plugins para o Grasshopper do pacote Ladybug/Honeybee. A sua modelagem utiliza as geometrias da edificação (envelope e paredes internas) e as aberturas do modelo BIM, a geometria do entorno imediato, além de informações necessárias para as simulações ambientais, como uso do edifício, características climáticas do local de projeto e materialidade. O uso do conjunto de indicadores implementados pode ocorrer desde o LOD 200, em etapas iniciais de projeto, onde as decisões têm maior impacto do que nos detalhamentos construtivos. Os indicadores IEQ possuem variados níveis de complexidade, e o trabalho focou em atributos que pudessem ser implementados em

LODs mais baixos. Porém existem diversos indicadores IEQ os quais a simulação exige um alto LOD, onde decisões de sistemas construtivos e materiais têm de estar bastante maduras. Para indicadores como a quantidade de renovação de ar ou nível de poluentes, pode ser necessária definição detalhada dos sistemas HVAC; ou para definição do nível de ruído acústico de um ambiente pode ser necessária definição geométrica e material de alto nível, que não são adequadas em etapas iniciais.

Figura 18 - Ilustração simplificada da modelagem necessária para a medição dos indicadores IEQ implementados.



Fonte - Autor, 2023.

Para a iluminação, a base de referência para avaliar os resultados foi composta por diretrizes normativas vigentes, que especificam os níveis adequados de iluminação para cada ambiente funcional, sinalizados na NBR 5413 (1992) dentro do SOMASUS v1 (2011).

Já para a base de referência do consumo energético, foram coletados dados pós-ocupação do consumo de 12 meses dos três edifícios amostrais construídos. A partir desses dados foi estabelecido um consumo médio esperado por metro quadrado para a tipologia, que serviu como referência para a avaliação. No entanto, é importante destacar que essa referência ainda não foi validada em um estudo aprofundado sobre sustentabilidade energética, ela é uma proposição inicial para a tipologia, assumindo que os valores estão satisfatórios. O trabalho não foca em desenvolver uma base de referência para esse indicador, campo de pesquisa no qual cabe exploração. É relevante ressaltar que o objetivo principal do indicador de consumo energético é sempre promover a minimização, buscando assim criar ambientes sustentáveis.

5.3. NORMAS E CÓDIGOS

Um terceiro conjunto de avaliações abordadas no trabalho é o de *Code Check*, ou checagem normativa. Utilizando a automatização da checagem normativa, sabe-se que pode estabelecer um processo mais rápido, eficiente e confiável (Junior, Tzortzopoulos, Baldauf, Pedro, Kagioglou, Formoso, Humphreys, 2021). Esses autores também apontam que automatizar a avaliação em projetos de saúde é um caminho que pode mitigar algumas problemáticas: a de abordar complexidade dos sistemas e subsistemas desses edifícios, a de lidar com o grande volume de informações do programa, e também a abordar os possíveis conflitos entre os objetivos dos *stakeholders* e as normas.

O tema de checagem de projeto por meio de regras semânticas já é amplamente debatido na bibliografia, conforme a revisão de literatura apontada por Pauwels, de Farias, Zhang, Roxin, Beetz, Roo e Nicolle (2017). Esses autores encontraram que existem diversos métodos para implementação de checagem, sistematizando-as em três: linguagens computacionais codificadas, tabelas paramétricas e guiadas por linguagem. O presente trabalho irá implementar as regras normativas por meio de tabelas paramétricas extraídas das normativas, como as RDCs. Também é apontado que o estado da arte deve utilizar modelos IFC, que são a linguagem de documentação de modelos BIM. Os autores apontam também que a flexibilidade desses sistemas é um atributo fundamental, e o projeto aborda isso criando uma ferramenta que serve para projetos de saúde de medicina diagnóstica descritos nas normativas.

Se aproximando do objeto proposto no projeto, ou seja, aplicando a checagem de projeto por meio de regras semânticas em projeto de medicina diagnóstica, Zhang, Nisbet, Ma e Broyd (2023) descrevem as capacidades de aplicar esses sistemas para edifícios de saúde. O trabalho descreve uma ampla revisão de literatura com *benchmarks* do tema, listando os avanços apresentados por 25 trabalhos desde 1987. É apresentado um fluxo para implementação do sistema, que inicia sistematizando as regras apresentadas nas normativas, classificando-as para implementação. A sistematização aponta quais regras são objetivas e quantitativas, e quais são subjetivas. Nela busca-se também verificar quais regras são interdependentes, ou condicionais a fatores de outras regras. Como resultados, o

trabalho implementou um protótipo do sistema de análise automática de compliance para um conjunto de seis normativas inglesas.

Um dos grandes desafios dos projetos de saúde é lidar com a complexidade normativa, e por conta disso a maior parte dos trabalhos com objetivos semelhantes ao projeto resultam em protótipos ou diretrizes. Junior, Tzortzopoulos, Baldauf, Pedo, Kagioglou, Formoso, Humpheys (2021) listam que os projetistas devem lidar com esse desafio por meio de automação de análise, cuidado com as regras subjetivas das normativas, e desenvolvendo sistemas internos da empresa utilizando linguagens visuais de programação (ferramental que o projeto utiliza) para checagem.

Portanto, há ampla discussão acadêmica sobre o tema proposto no projeto, mas não há *benchmarking* expressivo estabelecido. Existem ferramentas debatidas que podem ser utilizadas para o objetivo, como o Solibri, ferramenta de conferência de projeto IFC que o usuário precisa modelar regras semânticas, e está limitado aos atributos que a ferramenta oferece. Mas a abordagem proposta é de utilizar programação para desenvolver o sistema, de maneira que ele se adapte a totalidade das normativas vigentes em projetos de saúde no Brasil.

Tabela 8 - Mapeamento de indicadores normativos.

nome	temática	referência bibliográfica	o que é
Área mínima	<i>code check</i>	RDC 50	verifica se a área mínima do ambiente está atendida
Programa de necessidades	<i>code check</i>	RDC 50	verifica se a listagem mínima de ambientes está atendida
Raio inscrito mínimo	<i>code check</i>	Código de obras	verifica se o raio inscrito mínimo do ambiente está atendido
Largura mínima de circulações	<i>code check</i>	NBR 9050	verifica se a largura mínima da circulação está atendida

Fonte - Autor, 2023.

Dentro do contexto da checagem normativa, foram mapeados indicadores baseados em normativas que regem projetos de saúde no Brasil, incluindo a RDC

50, a normativa de acessibilidade NBR 9050 e o Código de Obras Municipal. A tabela 8 lista o mapeamento de parâmetros normativos desta pesquisa, o qual não esgota a totalidade de normas, mas traz um panorama representativo.

Dentre os indicadores, foram selecionados quatro essenciais para assegurar a conformidade dos projetos com as diretrizes estabelecidas. A seleção de quatro indicadores é apenas um recorte amostral para implementação, já que as normativas obrigatórias combinadas somam centenas de parâmetros e restrições. Os indicadores selecionados para implementação já são possíveis de se medir no LOD 200, e essa é uma das razões para sua seleção. Porém algumas outras exigências das normativas exigem informações de fases seguintes de projeto, LODs mais avançados, com especificações de sistemas prediais, e materiais.

O primeiro indicador é a área mínima de cada ambiente, que avalia se os espaços atendem aos critérios geométricos mínimos exigidos. O segundo indicador é o programa mínimo, que verifica se o projeto contém todos os ambientes necessários para a realização das atividades funcionais previstas. Além disso, o terceiro indicador é o círculo inscrito mínimo de cada ambiente, que garante que os espaços possuam áreas suficientes para permitir a circulação adequada. Por fim, o quarto indicador é a largura mínima de corredores, que assegura que os corredores tenham dimensões apropriadas para o fluxo de pessoas.

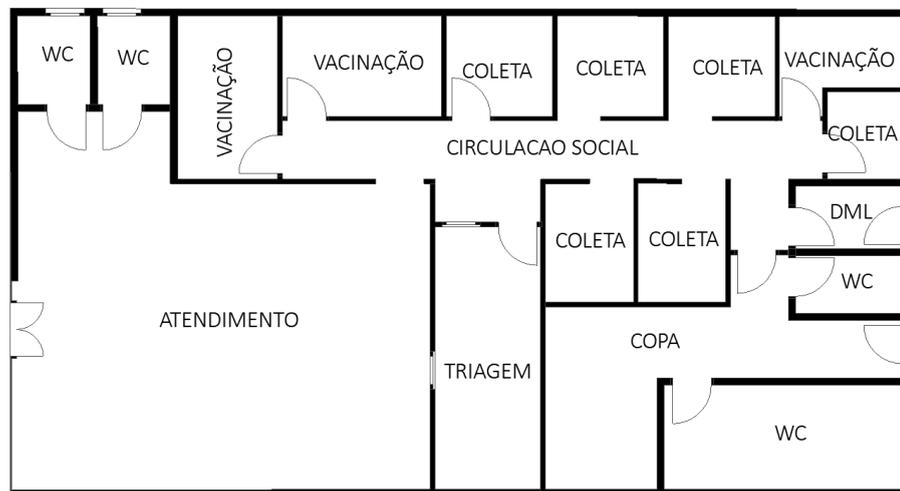
A medição desses indicadores foi realizada por meio de modelagem paramétrica no Grasshopper, permitindo uma avaliação precisa e eficiente. Com a checagem normativa, é possível comparar os valores medidos com os parâmetros máximos e mínimos estabelecidos pelas normas, garantindo assim que os projetos de saúde estejam em conformidade com as diretrizes regulatórias aplicáveis. Essa abordagem proporciona maior segurança e eficiência ao processo de projeto, contribuindo para a criação de espaços adequados e funcionais para as necessidades dos usuários.

6. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O algoritmo foi construído em uma interface visual de programação (IPV), e teve sua concepção baseada no *framework* já apresentado.

Para formar a base arquitetônica para a implementação do sistema, o trabalho coletou documentação arquitetônica e modelou na plataforma BIM quatro sedes de uma empresa de medicina diagnóstica em Fortaleza, Ceará, das quais apenas uma não foi construída. O Archicad foi o software BIM utilizado, e as modelagens foram em LOD 300, com geometrias exatas do projeto, e alguns metadados inseridos para servirem de input para a medição dos indicadores. Esse LOD foi escolhido por já contemplar os dados para calcular todos os indicadores selecionados para implementação. Propriedades BIM necessitaram ser padronizadas, principalmente a classificação da zona, para que os ambientes fossem indexados, e assim facilmente associados aos resultados das medições. Convenientemente, todos os modelos amostrais têm o mesmo programa de um posto de coleta de amostras, além de dimensões e materialidades semelhantes.

Figura 19 - Exemplos do programa arquitetônico utilizado para implementação do sistema.



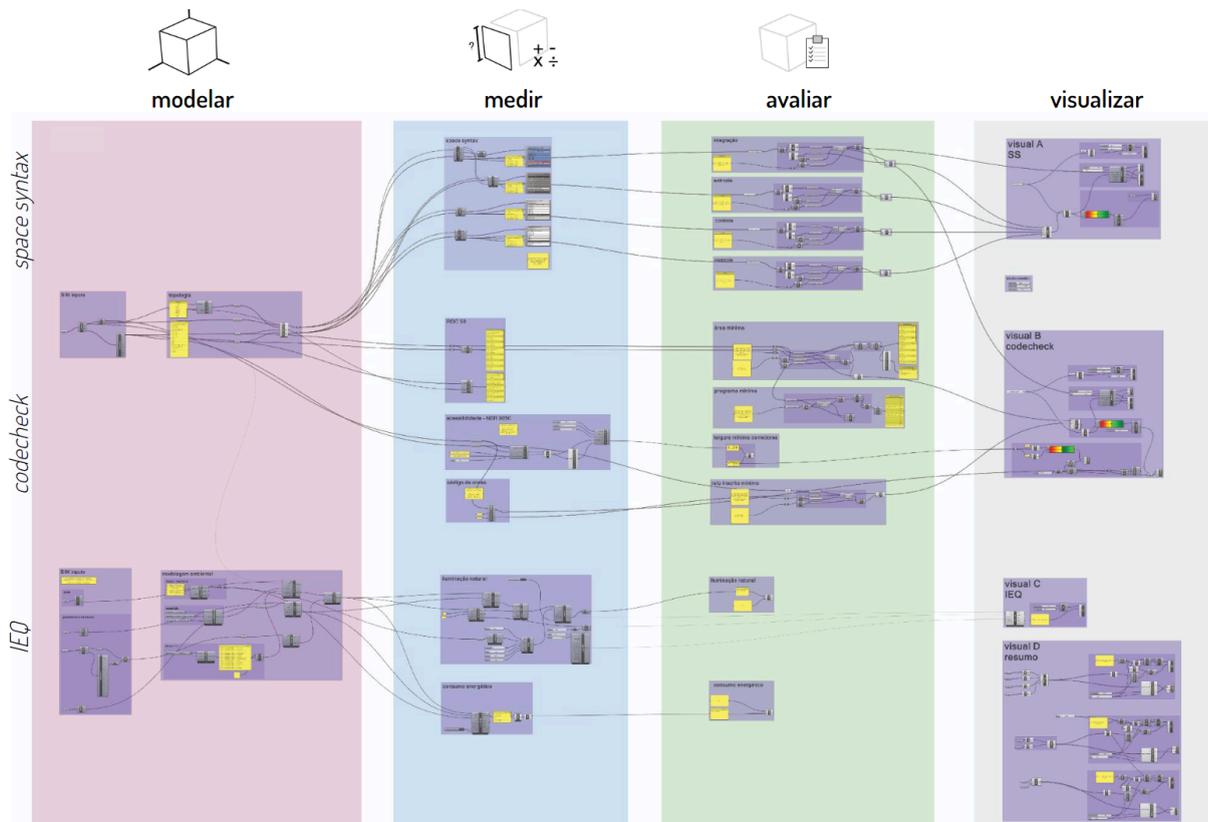
Fonte - Autor, 2023.

A figura 19 ilustra o programa arquitetônico utilizado, que é composto por área de atendimento para recepção das pessoas, salas de procedimento isoladas, que compartilham um corredor. Próximo a esses ambientes há uma sala de triagem e separação, para organização do material coletado nas salas, ou recebido pela

recepção. O programa também conta com circulação de serviço conectando os ambientes com uma saída para o exterior para fluxo de lixo, e uma área de funcionários com copa e banheiro.

Os edifícios amostrais serviram como suporte para desenvolvimento dos componentes computacionais, testes e ciclos de verificação e melhoria. Devido às suas diferenças de design, algumas funções puderam ser melhoradas a cada implementação. Em alguns momentos foram alterados os projetos arquitetônicos para stressá-lo em situações de inconformidade², ou também foram alterados os valores de referência em ambiente de teste para realizar melhorias nos visuais. Porém, quando os edifícios amostrais foram utilizados para explorar *benchmarkings* da tipologia para alguns indicadores, os modelos utilizados foram os com as dimensões precisas dos exemplares.

Figura 20 - Algoritmo em Grasshopper, com diagrama cromático representando o fluxo do *framework* no eixo X e os diferentes indicadores no eixo Y.



Fonte - Autor, 2023.

² As imagens de plantas apresentadas no trabalho não representam os projetos fornecidos pela empresa. Com o fim de ilustrar o sistema funcionando, as arquiteturas foram alteradas respeitando a privacidade dos dados.

A organização do algoritmo é uma matriz, onde o eixo X percorre o processo de modelar, medir e avaliar, e cada linha do eixo Y é um indicador. A estrutura modular do algoritmo apontada no design do *framework* pode ser observada na distribuição e fluxo. No eixo X o código tem um primeiro bloco de modelagem, onde as informações do modelo BIM são vinculadas à IPV. Em uma segunda etapa, cada indicador descrito é medido por meio de clusters desenvolvidos e plugins, agrupando aqui os módulos de medição (IQ). Na terceira etapa é onde são instanciados os módulos de avaliação (EM), momento em que os resultados dos indicadores são comparados com uma tabela de referência. No último bloco, estão as definições computacionais que representam os resultados da avaliação em visuais com código cromático e legenda.

6.1. INTERFACE DO MODELO

A implementação computacional do sistema usa como interface principal o BIM, devido ser o sistema estado da arte em gerir as informações geométricas e metadados de edificações. Partindo dessa tecnologia é possível integrar a atividade de projeto com as análises dos indicadores de maneira centralizada. Todas as decisões de projeto ocorrem no BIM (Archicad), e o usuário recebe o *feedback* dos indicadores em outra interface, que por sua vez é ligada em tempo real com o BIM. Essa interface que sedia os módulos de medição e avaliação dos indicadores é a Interface de Programação Visual (o projeto adota Rhino+Grasshopper). Na IPV o usuário lança os módulos de análise, vincula eles aos dados do modelo BIM, e recebe ainda nele *feedback* visual por meio de dashboards informacionais.

A materialização desses visuais se efetua no ambiente Grasshopper. Ao empregar os dados geométricos originários do modelo BIM e os resultados das avaliações dos indicadores, o Grasshopper elabora essas representações visuais elucidativas. Essa fusão computacional une os princípios do design arquitetônico a avaliações embasadas em dados, conferindo aos arquitetos uma ferramenta visual para a tomada de decisões embasadas e a otimização.

A incorporação dos indicadores em visuais dinâmicos que se atualizam em tempo real constitui um aspecto altamente relevante do *framework* proposto. Esses visuais reagem de forma imediata às modificações efetuadas pelo usuário no modelo BIM, proporcionando um *feedback* instantâneo acerca das escolhas de design. Por meio de uma codificação de cores, esses visuais traduzem de maneira

visual a discrepância entre os valores medidos e os valores de referência. A interface do *framework* abarca um painel abrangente, contendo visuais específicos para cada aspecto temático. Ademais, um visual de síntese reúne todos os indicadores, facilitando uma apreciação holística do desempenho global (conferir figura para ilustração). O usuário acessa esses visuais por meio do canvas do software Rhinoceros, utiliza o IPV para configurar a visualização, e ao mesmo tempo utiliza o Archicad como plataforma BIM para realizar o design.

Figura 21 - Dashboard da interface, com diferentes gráficos visuais customizáveis. Na instância da figura pode-se observar 4 gráficos: um de checagem normativa de área mínima, outro da sintaxe espacial exibindo a integração, outro ambiental mostrando a iluminação natural, e um gráfico de caixas que sintetiza a média de todos os indicadores.

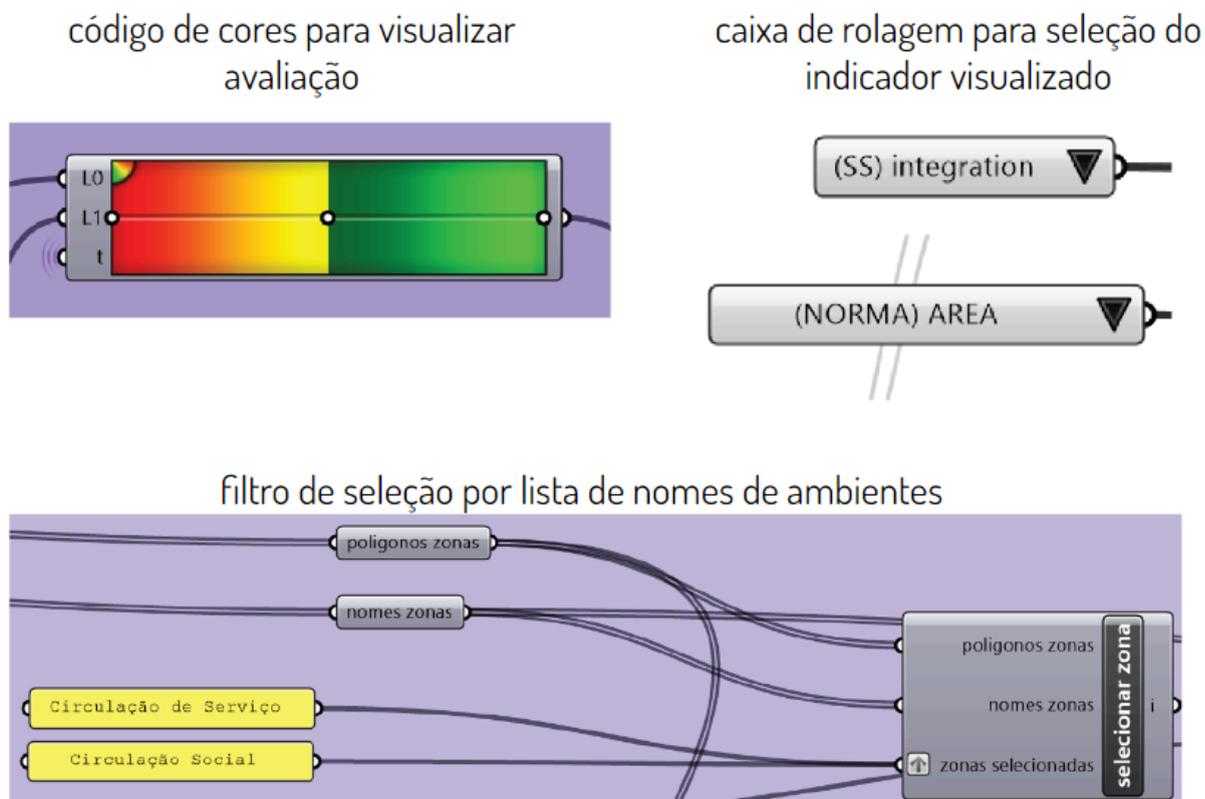


Fonte - Autor, 2023.

O sistema foi programado para que os usuários possam interagir ativamente com a interface, personalizando a visualização. É possível selecionar os indicadores de preferência, configurando os esquemas de cores e aplicando filtros à salas específicas. Utilizando esses dispositivos, é possível navegar nos diferentes indicadores analisados, e encontrar pontos de melhoria. A ferramenta torna-se mais útil se bem ajustada para o contexto do projeto e o usuário que irá receber o *feedback*. O projeto pode assim ter sua avaliação apresentada para os contratantes focando nos atributos que lhe interessam, ou ainda gerar visuais para análises de compliance só com indicadores normativos.

Na imagem 18 a seguir é possível observar as opções de customização dispostas. A tabela 9 aponta todos os indicadores implementados que o usuário pode selecionar na caixa de rolagem para ser exibido no dashboard.

Figura 22 - Dispositivos presentes no algoritmo responsáveis pela customização da visualização dos resultados da avaliação.



Fonte - Autor, 2023.

Tabela 9 - Indicadores implementados na ferramenta disponíveis para visualização.

temática	campo	indicador
configuração espacial	<i>space syntax</i>	integração entropia controle escolha
IEQ	conforto térmico	consumo energético para conforto
IEQ	conforto visual	iluminação natural consumo energético para conforto
normas e códigos	RDC	programa mínimo área mínima
normas e códigos	NBR 9050	largura mínima de corredores
normas e códigos	código de obras	círculo inscrito mínimo

Fonte - Autor, 2023.

Representar a avaliação em geometrias do projeto, principalmente na forma de planta, foi estratégia adotada para estabelecer *feedback* mais rápido e intuitivo. Alguns indicadores podem ter seus resultados exibidos em painéis de texto e tabelas, mas o trabalho buscou compor um design da informação visual sempre que possível. Para casos de indicadores como o programa mínimo, em que o resultado da avaliação era uma lista de ambientes faltantes, a forma mais fácil de comunicar foi textualmente. Textos também foram recurso valioso para informações complementares, como a legenda.

Na prática, os visuais dinâmicos em tempo real não apenas se colocam como instrumentos informativos, mas também possibilitam aprender por meio de percepções sobre as escolhas de design e seus rebatimentos. Ao visualizar o desempenho dos indicadores por meio de uma representação intuitiva em cores codificadas, os arquitetos podem prontamente identificar áreas que demandam atenção e aperfeiçoamento. A experimentação na concepção pode receber *feedback* capaz de direcionar e qualificar as decisões, e conseqüentemente desenvolver sensibilidade. Além disso, a interatividade inerente ao sistema permite que os usuários explorem diferentes opções de design, avaliem suas ramificações em

variados indicadores e ajustem a configuração do edifício de acordo com essas considerações. Esse processo iterativo nutre a criatividade e a tomada de decisão embasada em dados, culminando em projetos de edifícios de saúde que atendem tanto com os preceitos regulatórios quanto com as essenciais qualidades programáticas.

A relação de uma interface amigável ao usuário e uma abordagem guiada por dados consolida o sistema computacional como uma ferramenta substancial no processo de design. Por meio da interface pode-se simplificar os processos de análise, incrementando a eficiência e assegurando que os edifícios de saúde não apenas observem as regulamentações, mas também alcancem uma performance otimizada e a satisfação dos usuários.

7. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Neste capítulo é apresentado como foi feita a avaliação da ferramenta computacional desenvolvida para análise de indicadores em projetos de saúde. O objetivo da avaliação do artefato é demonstrar se atende aos objetivos especificados e cumpre a função proposta (Pries-Heje e Baskerville citado por Dresch, Lacerda e Antunes Jr., 2015). Deve-se verificar e validar um objeto gerado por meio da Design Science Research para atestar sua utilidade prática (Chakrabarti citado por Dresch, Lacerda e Antunes Jr., 2015).

Após a verificação e validação, o trabalho apresenta as conclusões e considerações finais. Esse sequenciamento é sugerido por Mentzer e Flint (citado por Dresch, Lacerda e Antunes Jr., 2015), pois por meio dos procedimentos de validação que se assegura que as conclusões podem ser aferidas.

7.1. VERIFICAÇÃO

Na verificação foram testadas as funcionalidades das ferramentas desenvolvidas nos modelos BIM dos edifícios amostrais, para conferência dos cálculos dos indicadores conforme etapa da *Black Box*. Para cada grupo de indicadores foi adotada uma estratégia de conferência, conforme quadro abaixo:

Tabela 10 - Descrição da verificação dos cálculos.

temática	método de verificação	justificativa
<i>space syntax</i>	comparação entre formulário pós-ocupação qualitativo e valores simulados: comparação ordinária de ambientes	devido indicadores subjetivos, adotou-se formulário pós-ocupação qualitativo
IEQ	comparação entre dados pós-ocupação e valores simulados: comparação ordinária entre edifícios	buscou-se verificar se a ordem dos edifícios com maior simulação era a mesma dos valores reais
normas e códigos	comparação entre medição manual dos ambientes e valores simulados	devido natureza geométrica dos indicadores, fez-se conferência manual

Fonte - Autor, 2023.

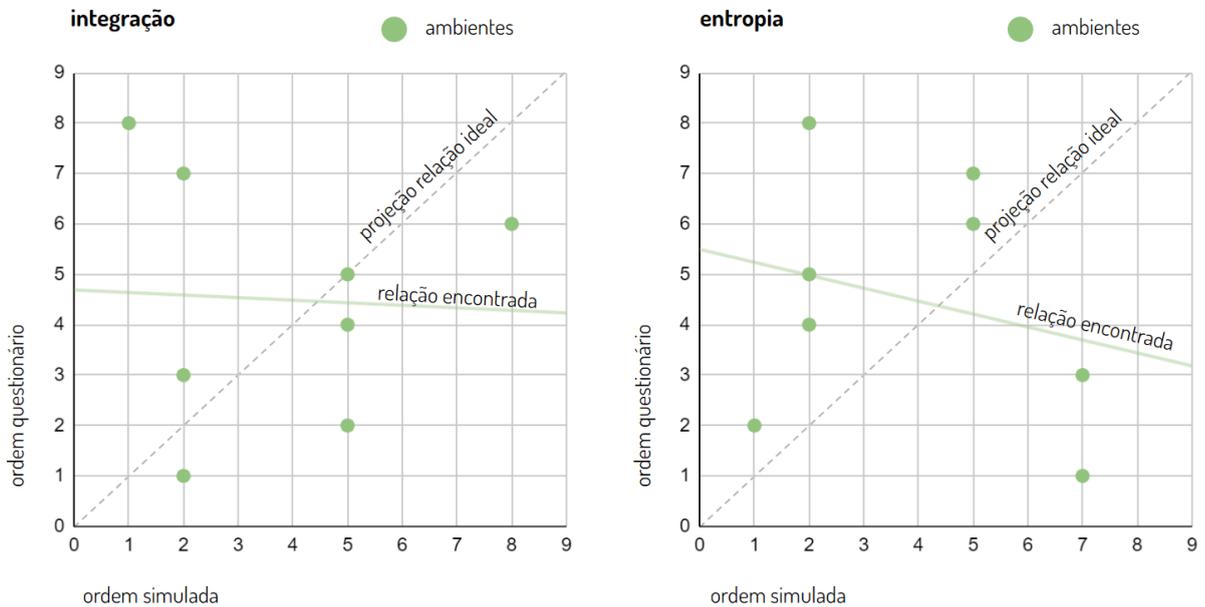
7.1.1 Configuração Espacial

A verificação dos resultados que o sistema apresentou na simulação de sintaxe espacial conta com confiabilidade já verificada por Nourian (2016), no processo de criação da ferramenta SYNTACTIC. O autor disponibilizou a ferramenta já capaz de simular resultados assertivos dos indicadores dessa temática. A partir disso, a atual pesquisa quis propor debate acerca da relação entre os indicadores medidos pelo sistema computacional e a percepção dos usuários sobre os aspectos medidos. O caso de estudo foi uma das edificações modeladas, e a coleta de dados pós-ocupação foi um questionário com um grupo de 6 usuários sobre sua percepção do espaço, que foram comparados com as medições do sistema computacional. No questionário os conceitos de dois indicadores foram explicados em linguagem simplificada, perguntando para os usuários sua percepção de cada ambiente para esses dois indicadores. Nas respostas era possível descrever um ambiente com respostas de “concordo totalmente” a “discordo totalmente” em afirmações que conceituavam os indicadores. Dessa maneira, para cada afirmação que um ambiente é integrado ou isolado (adaptação do termo “entropia”), as pessoas responderam se concordavam ou não com isso.

Os valores das duas fontes de dados foram tratados para comparação, devido aos diferentes tipos de dados coletados. A lista de ambientes foi ordenada tanto para o valor resultante da simulação computacional, como para a hierarquia medida no formulário. Dessa maneira, foram analisados os indicadores integração e entropia, buscando verificar se há correlação na ordinariade dos valores do sistema, e dos valores da percepção dos usuários do edifício. Tentou-se ver se os ambientes considerados mais integrados pelos usuários seriam de ordem semelhante à medida, e também os de maior entropia (foi utilizada a palavra “isolamento” para medir esse indicador no formulário, devido a complexidade do conceito de entropia). O questionário pode ser lido no apêndice 5.

Neste estudo não foram encontrados indícios que verifiquem que indicadores da sintaxe espacial medidos pelo sistema são coerentes com a percepção dos usuários. A ordem encontrada no questionário não apresentou proximidade relevante com a ordem medida. Isso pode ser explicado pelo pequeno espaço amostral de dados utilizados, mas principalmente devido à complexidade conceitual dos indicadores, podendo causar ruídos na aplicação dos formulários.

Figura 23 - Gráfico para verificação dos indicadores de sintaxe espacial. Nele cada ambiente é um ponto, posicionado de acordo com a ordem do ambiente nas duas formas de coleta de dados: da simulação e do questionário. Caso os pontos organizassem-se em uma reta a 45°, provaria-se que a percepção dos usuários apresenta indícios de relação com os valores simulados.



Fonte - Autor, 2023.

7.1.2 IEQ

Para verificar os resultados da simulação ambiental, foi comparado o consumo energético kWh/m² simulado e medido em um período de 12 meses para 3 edifícios. Na tabela 12 abaixo podemos observar os resultados da verificação e a margem de erro encontrada. Foi observado que a ordem dos edifícios que mais consomem foi igual entre a simulação e os dados coletados, apontando que os resultados estão coerentes com o propósito. É importante ressaltar que nessa análise os resultados quantitativos absolutos da simulação ainda possuem margem de erro considerável. Mas esse indicador pode ser sim utilizado como um norteador da tomada de decisão, visto que as situações que a simulação esperava maior consumo foram comprovadas por meio dos dados pós-ocupação. Não foram verificados os resultados da iluminação natural simulada, pois o trabalho não coletou os resultados pós-ocupação desse indicador.

Tabela 11 - Resultados da verificação dos cálculos de consumo energético.

	edifício DL	edifício E	edifício Q
consumo mensal médio kWh	2285	1726	2609
m ²	150	142	183
consumo real kWh/m ²	15,23	12,15	14,26
simulado kWh/m ²	12,8	12,07	12,3
margem de erro	15,9%	0,7%	13,7%

Fonte - Autor, 2023.

7.1.3 Normas e Códigos

Foram realizados cálculos manuais e conferidos motores de cálculo dos indicadores normativos. Na verificação deles foram encontradas possíveis melhorias em duas implementações: no raio inscrito e na largura de corredores.

A ferramenta que mede o raio inscrito utiliza método partindo do centróide do polígono do ambiente, e testando raios crescentes até encontrar o maior possível. Porém, em polígonos convexos o centróide não tem grande eficácia, pois o centro geométrico dessas formas não costumam ser no local que comporta o maior círculo.

A medição de largura de corredores nos casos de corredores com eixo poligonal, ou seja, que não são simplesmente uma reta, também apresentou melhorias. Nesses casos, quando modelados como uma zona única, a aplicação desenvolvida não demonstrou resultados satisfatórios. Esse problema foi facilmente resolvido ao adotar a prática de modelagem de segregar as zonas nos mesmos segmentos do eixo do corredor. Segue como uma melhoria possível adaptar a ferramenta para todos os casos.

7.2 VALIDAÇÃO

A validação do artefato ocorreu por meio de uma oficina aplicada à projetistas de uma empresa especializada em projetos de saúde, em um grupo de 3 pessoas. Para isso, a interface projetada foi apresentada por meio de uma palestra demonstrativa, na qual o *framework* foi explanado. Para validação foi dado enfoque na tela que o usuário utiliza para receber *feedback*, apresentando e manuseando os visuais para que os participantes compreendessem como a ferramenta é utilizada e quais seus potenciais. Durante a oficina a ferramenta não foi manuseada pelos

projetistas, mas a partir das instruções e dúvidas deles a interface foi sendo navegada e customizada para compreensão. Em seguida, houve uma rodada de debates sobre a aplicação prática da ferramenta, e quais os possíveis impactos que incorporar a avaliação automatizada pode ter no processo de projeto.

A partir da apresentação, por meio de um formulário digital assíncrono, foi coletado *feedback* com os pares que participaram da oficina. O formulário pode ser encontrado no apêndice 5, e ele é composto de perguntas sobre a navegação, clareza das informações, usabilidade, *feedback* visual, design, estética, e customizações e melhorias. A tabela 12 mostra os resultados preponderantes das perguntas múltipla escolha:

Tabela 12 - Resultados do formulário de validação do sistema.

pergunta	resposta mais frequente
É fácil de encontrar as informações necessárias nas telas da interface.	Concordo
A organização das informações facilita a navegação.	Concordo
As informações apresentadas são claras e compreensíveis.	Concordo
A interface atende às suas necessidades de forma eficiente.	Concordo
A interface fornece <i>feedback</i> visual suficiente para suas ações.	Concordo
Você se sente orientado(a) sobre o que está acontecendo visualmente na interface.	Neutro
O design da interface é atraente e visualmente agradável.	Concordo

Fonte - Autor, 2023.

Os resultados reforçaram a relevância da ferramenta para a atividade de avaliação de projetos de saúde. A interface de *feedback* visual foi reconhecida como a função mais útil, pois com a escala de cores facilita-se equalizar ambientes mais e menos fora de norma. Os pares apontaram melhorias na ferramenta, listadas na tabela 13. A partir das melhorias apontadas a interface foi ajustada, de maneira a incorporar informações aos visuais que trouxesse mais clareza e assertividade no design da informação. Na figura 20 está o gráfico de *feedback* atualizado a partir da validação com ajustes nas camadas existentes, e acréscimo de informações na legenda que melhoram a interpretação e o destaque das inconformidades.

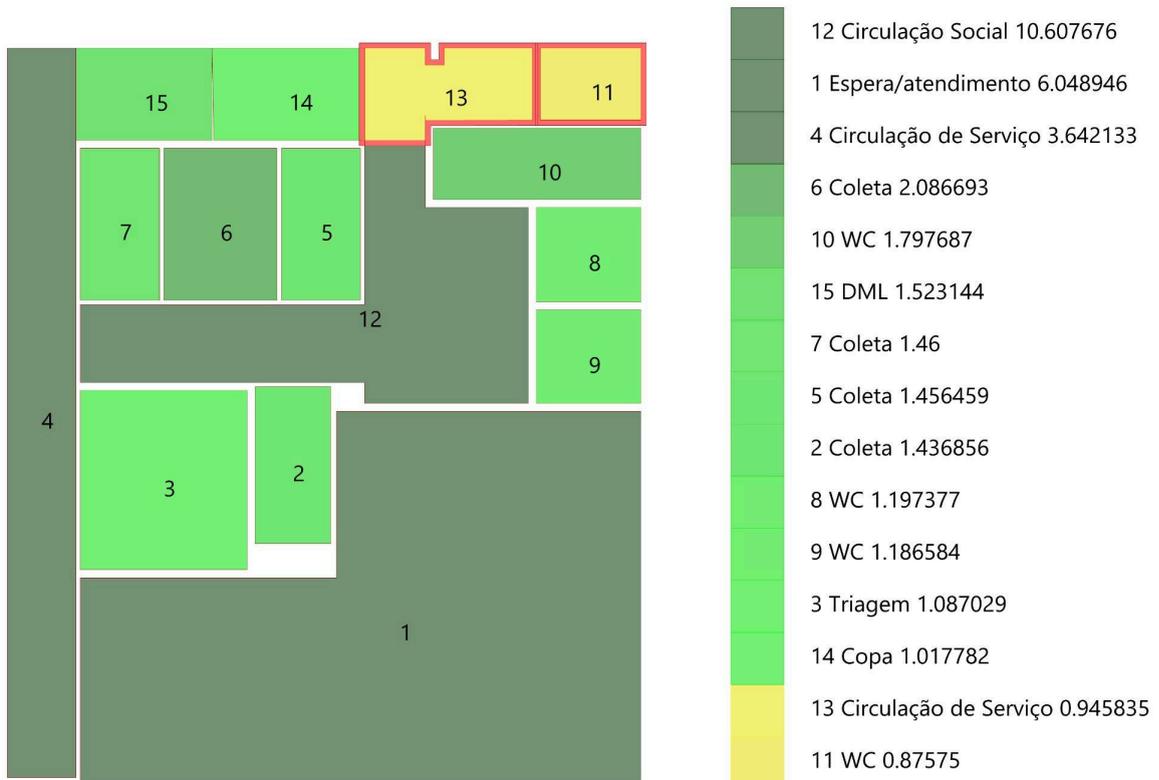
Tabela 13 - Resultados do formulário de validação do sistema.

pergunta	resposta
Há algum aspecto visual que você acredita que poderia ser melhorado?	<ul style="list-style-type: none"> • Mais destaques nos ambientes fora de norma; • Os diagramas precisam estar etiquetados, com highlight quando passar mouse; • Adicionar escala de cores para os ambientes com parâmetros muito acima do desejado.
Que funcionalidades adicionais seriam úteis para você?	<ul style="list-style-type: none"> • Incorporação de referências customizáveis para serem usadas como critério de avaliação.
Você encontrou algum problema específico na interface? Se sim, poderia descrever esse problema?	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de destaques mais claros de ambientes aquém do esperado.

Fonte - Autor, 2023.

Figura 24 - Gráfico de avaliação melhorado após *feedback* de validação.

(CodeCheck) min. area



Fonte - Autor, 2023.

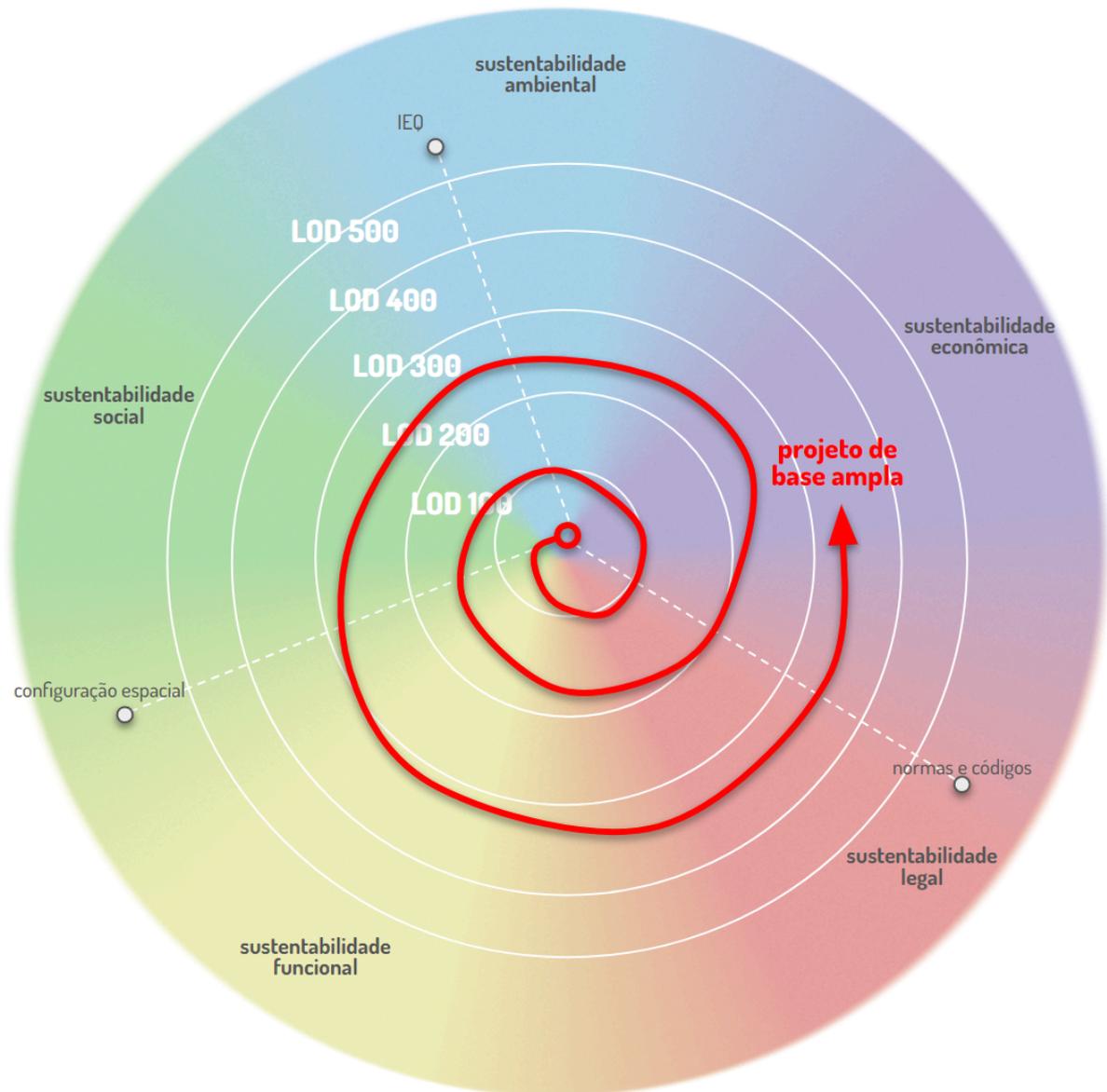
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem foco em debater como as contribuições científicas do trabalho interagem com nos campos de estudo teóricos, práticos e metodológicos. Aqui também são comentadas algumas das soluções encontradas para algumas lacunas apontadas na literatura, bem como as limitações enfrentadas, e assuntos que ainda tem perguntas pertinentes em aberto.

As etapas percorridas exploraram uma solução possível para a classe de problema do suporte à decisão em projeto. A modelagem e design da informação foi tema que delineou a pesquisa e desenvolvimento de um artefato, uma ferramenta computacional, para solucionar o problema. Ao longo do trabalho foram discutidos os constructos ontológicos base para o pensamento sistêmico, e sistematizados percursos teóricos que culminaram na computação como estratégia para abordar os problemas da tomada de decisão em design. Pensar em dispositivos que suportam o processo de projeto, definir um fluxo de informações para melhorar atributos de um projeto não são temas novos. A solução produto do trabalho surgiu conceitualmente baseando-se em investigações científicas de períodos em que a computação possuía menos recursos, e hoje os meios de implementação desses sistemas migraram para o digital. Com as ferramentas contemporâneas tornou-se possível implementar um fluxo de análise de projeto, no qual a concepção ocorre simultaneamente à análise, munindo de informação a tomada de decisão.

Fornecer um crítico artificial de projeto foi uma contribuição científica do trabalho frente à lacuna apontada pela literatura, onde há espaço para criação de sistemas capazes de fornecer *feedback* em tempo real. Os avanços encontrados no *framework* estão sistematizados na descrição de elementos fundamentais para o desenvolvimento da ferramenta. Dentre eles estão a definição da estrutura computacional, a listagem das atividades em cada interface computacional, a concepção dos diferentes módulos necessários, o fluxograma geral do processo, e estrutura para abordar as diferentes etapas de projeto por LOD. A estrutura por LOD produzida pelo trabalho serve especialmente para atender à necessidade de exploração de modelos de baixa resolução apontada na literatura, que podem ser lançados em etapas iniciais do projeto, e progressivamente ganhar definição.

Figura 25 - Diagrama ilustrando o processo de projeto de base ampla, que inclui diferentes eixos de sustentabilidade (Radford, 2003), onde o projeto desde os LODs iniciais atravessa diversos aspectos para avaliação. Também estão ilustrados os temas utilizados pelo trabalho dentro do amplo espectro de temáticas possíveis. É interessante perceber que antes de ir para o próximo LOD, o percurso de projeto atravessa diferentes áreas, e uma temática é cruzada diversas vezes no percurso de projeto.



Fonte - Autor, 2023.

Estruturar como as diferentes etapas de projeto podem ser auxiliadas por ferramenta digital foi desafiante, assim como foi enfrentar criar um sistema de análise de base ampla de critérios. Propor um *framework* que permitisse integrar diversas disciplinas em uma plataforma de *feedback*, foi um desafio longe de ser

esgotado pelo trabalho. Foi encontrada inicialmente dificuldade em lidar com a grande quantidade de variáveis que podem ser analisadas. A primeira ação a partir disso foi definir quais aspectos devem ser considerados, ou seja, quais indicadores são relevantes e indispensáveis para analisar um determinado projeto. Cada tipologia e contexto de projeto exige que diferentes atributos sejam analisados, e tenham seus objetivos definidos. A dificuldade aqui era em como disponibilizar informações úteis ao usuário com olhar holístico, abrangendo distintos indicadores que mais geram impacto no ciclo de vida da edificação. As respostas de quais indicadores devem ser analisados são abordadas na literatura muitas vezes de maneira monotemática, onde as proposições só representam um conjunto de qualidades por vez. Propor ferramenta que avalie integradamente questões de diferentes temáticas foi uma contribuição científica na direção de um processo de projeto de base ampla. Computadorizar indicadores de projeto é hoje facilitado pelo desenvolvimento científico de pares, que já estudaram, implementaram e divulgaram ferramentas digitais capazes de medir os atributos da edificação. A estrutura apresentada no trabalho busca incentivar a colaboração entre as diferentes áreas do conhecimento, centralizando em um modelo digital os diferentes motores de cálculo e bases de referência. A estratégia computacional que facilitou esse avanço foi a concepção modular do algoritmo, na qual cada dispositivo de análise pode ser desenvolvido isoladamente, para então serem reunidos em modelo único de acordo com as necessidades.

Os módulos que podem ser implementados para a tipologia de arquitetura da saúde foram mapeados, listando os indicadores a partir das três temáticas sistematizadas. A contribuição apresentada serve para que estudos futuros tenham um ponto de partida teórico geral para a implementação de sistemas análogos, e ponto de partida prático para a parte dos indicadores listados que foi implementada.

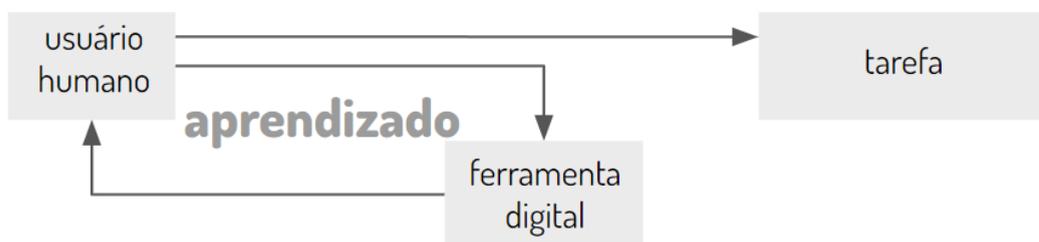
Em seguida, criar um mecanismo para comunicar a avaliação ao usuário foi uma tarefa que se mostrou importante durante o desenvolvimento da ferramenta. Dessa maneira, implementar representação visual representou um desafio interessante para fornecer *feedback* rápido, no qual facilmente verifica-se se o projeto está adequado, ou onde necessita ajuste. A tomada de decisão com base em informações representadas visualmente pode ser mais rápida, e de melhor comunicação do que o processo subjetivo de análise humana. O design da informação diagramado em dashboard também auxilia a tomada de decisão

multicritério, onde a otimização de projeto parte da subjetividade humana, mas é ampliada pelo *feedback* computacional. A proposição avança também sugerindo customizações que adaptam a visualização dos resultados às necessidades de cada caso.

Experimentalmente durante o processo de criação auxiliado pelos visuais mostrou potencial de desenvolver intuição ao designer, por meio do aprendizado e experiência. As consequências da manipulação da forma, e dos elementos arquitetônicos tornam-se fenômenos sensíveis, por um instante menos racionais. Nesse processo, o aprendizado pode direcionar-se para a intuição, e a complexidade da tomada de decisão dilui-se um pouco na criatividade.

O potencial aprendido construído pelo designer ao manusear a ferramenta pode criar sensibilidade capaz de antever os impactos de suas decisões. Portanto, a ferramenta pode eventualmente auxiliar o designer não apenas durante seu uso, mas na construção de conhecimento necessário para a boa decisão em design. O uso contínuo, e o processo de tentativa e erro podem construir repertório para o projetista de maneira que seu próximo design já conte com os insights do seu acervo de experiências. Dessa maneira fomenta-se o aprendizado humano utilizando uma ferramenta computacional. O conhecimento que emerge desse ciclo forma a inteligência para realizar crítica às proposições de design.

Figura 26 - Esquema que ilustra a emergência do aprendizado a partir dos ciclos de *feedback* que a ferramenta digital proporciona ao usuário humano.



Fonte - Autor, 2023.

Esta é uma interface possível entre o aprendizado, o humano e a máquina que reforça o criativo como um atributo humano, e a máquina como dispositivo facilitador. O *feedback* fornecido pelo sistema serve como nova fonte de dados para o aprendizado humano, e a representação visual proposta no sistema funciona como

dispositivo facilitador da apreensão e comunicação. Isso é particularmente útil para as qualidades da arquitetura que não se manifestam de maneira tão explícita, e carregam complexidade na sua análise.

Enquanto generalização, a estrutura do sistema proposto fornece um mecanismo para implementação de indicadores temáticos relevantes para diferentes contextos de projeto. Modelar, medir e avaliar, é um fluxo que pode ser implementado independentemente do indicador, ou tipologia. A tomada de decisão de outras tipologias atravessa outros objetivos, ou ainda novos referenciais para os indicadores existentes. A síntese desse processo é uma das principais contribuições, pois independentemente do contexto ou natureza da análise, o *framework* proposto serve para implementação de um sistema de avaliação.

A solução automatizada proposta também tem potencial implementação em contextos onde a avaliação de projeto não é realizada pelo designer. Se tomarmos como exemplo órgãos aprovadores, a análise de conformidade em projetos é desafio demandante, e que exige grande capital humano, e pode se beneficiar da solução proposta. Há, porém, uma limitação técnica na implementação do sistema proposto em lugares onde a plataforma de programação visual não é dominada. Sem a IPV não é possível vincular os dados do modelo BIM para o algoritmo de análise, bem como efetuar eventuais ajustes para melhor operacionalização.

Durante a elaboração do trabalho surgiram algumas limitações e melhorias que não foram totalmente solucionadas. Analisando o artefato gerado, foi proposto um sistema que avalia os indicadores, e não os sintetiza em índices. O trabalho até sugere um gráfico visual que facilita a visualização do conjunto de indicadores apresentados de maneira resumida, mas não foram desenvolvidas variáveis cujo resultado agregasse a avaliação. Não havia a intenção de criar um modelo de tomada de decisão multicritério, que busque equalizar, ponderar e hierarquizar os indicadores. A proposta foi dar à subjetividade do usuário a tomada de decisão informada pela visualização avaliativa dos indicadores. Dessa maneira, criar uma estrutura de índices sintéticos que aglutina os indicadores, e os atribui ponderações, pode ser caminho para descrever simplificada a qualidade do design. Em contextos complexos, em que a quantidade de indicadores é grande, a estratégia de utilizar índices sintéticos pode ser adequada. Para isso, o caminho pode ser a criação de variáveis de nível hierárquico maior que os indicadores, capazes de aferir a qualidade de um conjunto de indicadores em menos variáveis.

Há uma demanda relevante para pesquisas desenvolverem sistemas de índices focados em auxiliar a tomada de decisão multicritério. A partir da sistematização dos indicadores neste trabalho, aglutinar as variáveis por temática é um caminho futuro coerente para a tipologia estudada. Mas para isso, as pesquisas futuras devem investigar e propor hierarquias para as variáveis, o que representa grande desafio. Utilizando o *framework* produzido, avançar na implementação de indicadores, ou índices, já tem o caminho pavimentado. Para estudos que objetivem explorar a decisão multicritério, é um desafio construir visualização que represente múltiplos indicadores avaliados, havendo espaço para a proposição de artefatos que auxiliem a resolução deste problema.

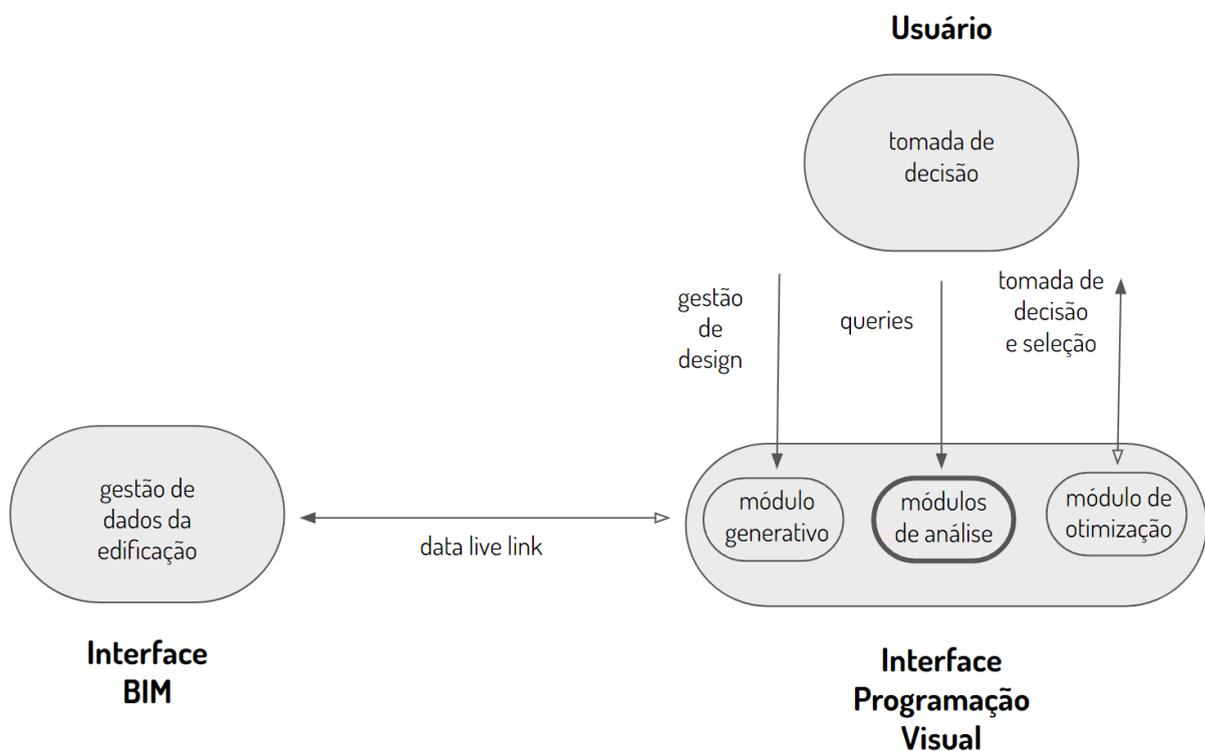
Durante a exploração de indicadores, percebeu-se também que há uma lacuna nos *benchmarks*, necessários para transformar a medição de indicadores em uma avaliação crítica de objetivos. Para alguns dos indicadores há pouca literatura que referenciam quais os valores ideais para as diferentes tipologias, ambientes, contextos regionais e culturais. Se tomarmos indicadores da sintaxe espacial como exemplo, não foi encontrada literatura que indicasse qual o valor ideal de integração para uma recepção. Dessa maneira, construir uma base de referência que descreve medidas ideais de indicadores de maior grau de subjetividade é uma tarefa ainda não concluída. A sistematização da base de referência para indicadores utilizados na medicina diagnóstica era um dos caminhos que a dissertação tentou utilizar para contribuir com conhecimento sobre a tipologia arquitetônica, e que ainda há bastante espaço para exploração.

O trabalho também amplia o espaço para exploração de outros paradigmas da criatividade computacional, como por exemplo a concepção do design ser feita por sistemas computacionais com algum grau de autonomia. Automatizar geração de opções e otimização não foi objetivo da pesquisa, pois foi buscado o paradigma da criatividade computacional da co-criação, onde a concepção e modelagem são geradas pelo usuário, mas auxiliadas pela computação.

Porém a estrutura modular do artefato proposto pode ser encaixada em um sistema de geração e seleção. Incorporar o mecanismo de geração ao de análise, permite automatizar a otimização por meio da avaliação das instâncias, e a seleção das que mais satisfazem as condições de projeto. Com um módulo generativo se criam inúmeras opções, com o módulo de análise essas instâncias são descritas, e por meio de um módulo de otimização com objetivos atribuídos são apontadas os

designs mais adequados ao predicado. A automatização da otimização é um campo de pesquisa com grande relação com a decisão multicritério, comentada anteriormente. Modelos de otimização se beneficiam diretamente dos avanços no conhecimento em decisão multicritério, pois melhoram a seleção das instâncias com perfil mais adequado aos objetivos. Na figura 19 é possível observar os papéis das interfaces e do usuário, e destaca-se entre os módulos na IPV o desenvolvido pelo presente trabalho.

Figura 27 - Possível estrutura computacional com geração e otimização automatizada.



Fonte - Autor, 2023.

Já analisando a escala da implementação dos módulos, melhorias também foram identificadas. A vinculação de modelos BIM à IPV é uma atividade que exige conhecimento técnico, e pode apresentar dificuldade para um usuário BIM. Um exemplo é na modelagem dos grafos para a implementação da medição dos indicadores da sintaxe espacial, no qual o sistema reconhece automaticamente os ambientes, mas as relações de vizinhança tem que ser implementadas manualmente, na forma de uma lista. A automatização do reconhecimento de vizinhança pode facilitar a implementação da ferramenta, e gerar os grafos com mais velocidade e assertividade, reduzindo a quantidade de inputs na IPV. Reduzir a

quantidade de interações do usuário com a IPV é um objetivo para melhor implementação computacional, pois para manuseá-la o nível de conhecimento é menos acessível do que na interface BIM. Essa problemática fica mais evidente nas simulações ambientais, as quais exigem modelagem mais complexa, e número maior de inputs, o que dificulta eventuais debugs pelo usuário não desenvolvedor. Essa limitação técnica também dificulta a expansão da ferramenta para simulações mais complexas, como de vento ou renovação de ar (CFD). Na implementação da medição dos indicadores normativos, algumas limitações foram encontradas: a dificuldade para encontrar o maior círculo inscrito em polígonos convexos, e na dificuldade para encontrar o maior círculo inscrito ao longo de um polígono. Para elas, uma possível solução seria treinar modelos de aprendizado de máquina para chegar em uma solução matemática satisfatória, capaz de medir o indicador assertivamente, uma vez que são problemas geométricos de baixa complexidade comparada com a capacidade desses modelos.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. (2002). RDC 50: Regulamento técnico para planejamento, programação, elaboração e avaliação de projetos físicos de estabelecimentos assistenciais de saúde. [Online]. acessado em 12/01/2023, https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2002/rdc0050_21_02_2002.html

ALASSAF, Nancy e CLAYTON, Mark. (2021). "The Use of Diagrammatic Reasoning to Aid Conceptual Design in Building Information Modeling (BIM)".

ALEXANDER, Christopher. (1968). "Systems Generating Systems". In: Menges, Achim, e Sean Ahlquist. "Computational Design Thinking", 2011.

ÁLVAREZ, Natalia, MARCELO BERNAL, e KATHERINE CÁCERES. (2020). "Evolution and Projection of Computational Design Theories: Generation, Analysis, Selection and Fabrication". Em Blucher Design Proceedings, 120–27. Medellín, Colombia: Editora Blucher.

ALZOUBI, H., AL-RQAIBAT, S., & BATAINEH, R. F. (2010). Pre-versus post-occupancy evaluation of daylight quality in hospitals. *Building and Environment*, 45(12), 2652–2665. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.027>

BENNETTS, Helen, ANTONY RADFORD, e TERRY WILLIAMSON. (2003). *Understanding Sustainable Architecture*. 0 ed. Taylor & Francis.

VON BERTALANFFY, Ludwig. "The Meaning of General System Theory". (1969). In: Menges, Achim, e Sean Ahlquist. "Computational Design Thinking", 2011.

CAMPANA, Gustavo A., FARO, Lorena B., GONZALEZ, Carmem P. "Fatores competitivos de produção em medicina diagnóstica: da área técnica ao mercado". (2009). *Bras Patol Med Lab*, v.45, n 4, p.295-303.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JR. V. "Design Science Research: A Method for Science and Technology Advancement". (2015). Cham: Springer International Publishing.

EASTMAN, C., LEE, J. min, JEONG, Y. suk, & LEE, J. kook. (2009). Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in Construction*, 18(8), 1011–1033.

FIUZA, Rafael; JORGE, Leonardo; SAMPAIO, Hugo; CARDOSO, Daniel. "Brazilian Design: Parametric modeling as memory of vernacular artifacts". (2018). p. 199-204. São Paulo: Blucher.

GERO, J. S. (Org.). (1985). *Design optimization*. Academic Press.

VON GOETHE, Johann Wolfgang. "Formation and Transformation". (1806). In: Menges, Achim, e Sean Ahlquist.. "Computational Design Thinking", 2011.

GU, Ning, e PEIMAN AMINI BMURPHEHBAHANI. (2021). "A Critical Review of Computational Creativity in Built Environment Design". *Buildings* 11 (1): 29.

JIN, R., ZHONG, B., MA, L., HASHEMI, A., & DING, L. (2019). Integrating BIM with building performance analysis in project life-cycle. *Automation in Construction*.

JÚNIOR, Nivaldo. "Indicadores de Desempenho em Projetos de Arquitetura no Eixo Brasília-Goiânia". (2010). Dissertação. Universidade de Brasília.

JUNIOR, J., TZORTZOPOULOS, P., BALDAUF, J. P., PEDO, B., KAGIOGLOU, M., FORMOSO, C. T., & HUMPHREYS, J. (2021). Automated compliance checking in Healthcare Building Design. *Automation in Construction*, 129, 103822.

KOLAREVIC, Branko, e ALI MALKAWI, orgs. (2005). *Performative architecture: beyond instrumentality*. New York: Spon Press.

KOLAREVIC, Branko. "Computing the Performative". (2014). Londres, em *Theories of the digital in architecture*.

LIMA DA SILVA, Juliano, ANDRÉA QUADRADO MUSSI, THAÍSA LEAL DA SILVA, e PAOLA ZARDO. (2018). "Designers of the XXI century: BIM software programming and the development of new competencies". Em *Blucher Design Proceedings*, 538–45. São Carlos, BR: Editora Blucher.

LIMA, Mariana Monteiro Xavier de. *Metamodelo para integração de multidesempenhos em projeto de arquitetura*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, 2016.

C.L. LOCKE, D.S. POPE. "Assessment of medical-surgical patients' perception of hospital noises and reported ability to rest". (2017) *Clin. Nurse Spec.* 31 (5) (2017) 261–267.

MANZIONE, Leonardo. (2013). "Proposição de uma estrutura conceitual de gestão do processo de projeto colaborativo com o uso do BIM." *Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana*, São Paulo: Universidade de São Paulo.

MAVER, Thomas W. "Pace 1: Computer aided building appraisal". (1971). *Architects Journal*, vol July 1971, 207-214.

MAVER, Thomas W. "Appraisal in Design" in *Design Studies*, 1(3), 1980, pp. 160-165.

MENGES, Achim, e SEAN AHLQUIST. (2011). "Computational Design Thinking", 2011.

MITCHELL, William J. (1990). *The Logic of Architecture: Design, Computation and Cognition*. 6. print. Cambridge, Mass.: MIT Press.

MURPHY, Michael. "The role of architecture in fighting a pandemic". (2020). *The Boston Globe*, Boston, MA, USA. 06/04/2020. Disponível em: shorturl.at/glzXZ.

NIMLYAT, P. S., & KANDAR, M. Z. (2015). Appraisal of indoor environmental quality (IEQ) in healthcare facilities: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 17, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.002>.

NOURIAN, Pirouz. "Configraphics: Graph Theoretical Methods for Design and Analysis of Spatial Configurations". (2016). *Architecture and the Built environment*, v.14.

OXMAN, Rivka, e ROBERT OXMAN, orgs. (2014). *Theories of the digital in architecture*. London ; New York: Routledge, Taylor & Francis Group.

PASK, Gordon. "The Architectural Relevance of Cybernetics". (1969). In: Menges, Achim, e Sean Ahlquist. "Computational Design Thinking", 2011.

PAUWELS, P., DE FARIAS, T. M., ZHANG, C., ROXIN, A., BEETZ, J., DE ROO, J., & NICOLLE, C. (2017). A performance benchmark over semantic rule checking approaches in construction industry. *Advanced Engineering Informatics*, 33, 68–88.

PEFFERS, Ken, TUUNANEN, Tuure, ROTHENBERGER, Marcus, CHATTERJEE, Samir. "A Design Science Research Methodology for Information Systems Research". (2007) *Journal of Management Information Systems*, v.24, p.45-77.

RAHMANI ASL, Mohammad, SAIED ZARRINMEHR, Michael Bergin, e Wei Yan. (2015). "BPOpt: A Framework for BIM-Based Performance Optimization". *Energy and Buildings* 108 (dezembro): 401–12.

SHEN, X., ZHANG, H., LI, Y., QU, K., ZHAO, L., KONG, G., & JIA, W. (2023). Building a satisfactory indoor environment for healthcare facility occupants: A literature review. *Building and Environment*, 228.

SZENTESI-NEJUR, Szende, DE LUCA, Francisco, e NEJUR, Andrei. [Sem data]. "Integrated Architectural and Environmental Performance- Driven Form-Finding", 10.

THOMPSON, D'arcy. "On the Theory of Transformations, or the Comparison of Related Forms". (1917). In: Menges, Achim, e Sean Ahlquist. [Sem data]. "Computational Design Thinking", 2011.

VIEIRA, Jorge. "Sistemas e Significação". (2003). In: Feltes, Heloísa Pedroso de Moraes, e Ana Maria (Org.). *Produção de sentido: estudos transdisciplinares*. Caxias do Sul; Porto Alegre; São Paulo: Editora da Universidade de Caxias do Sul ; Nova Prova Editora ; Annablume. p341-356.

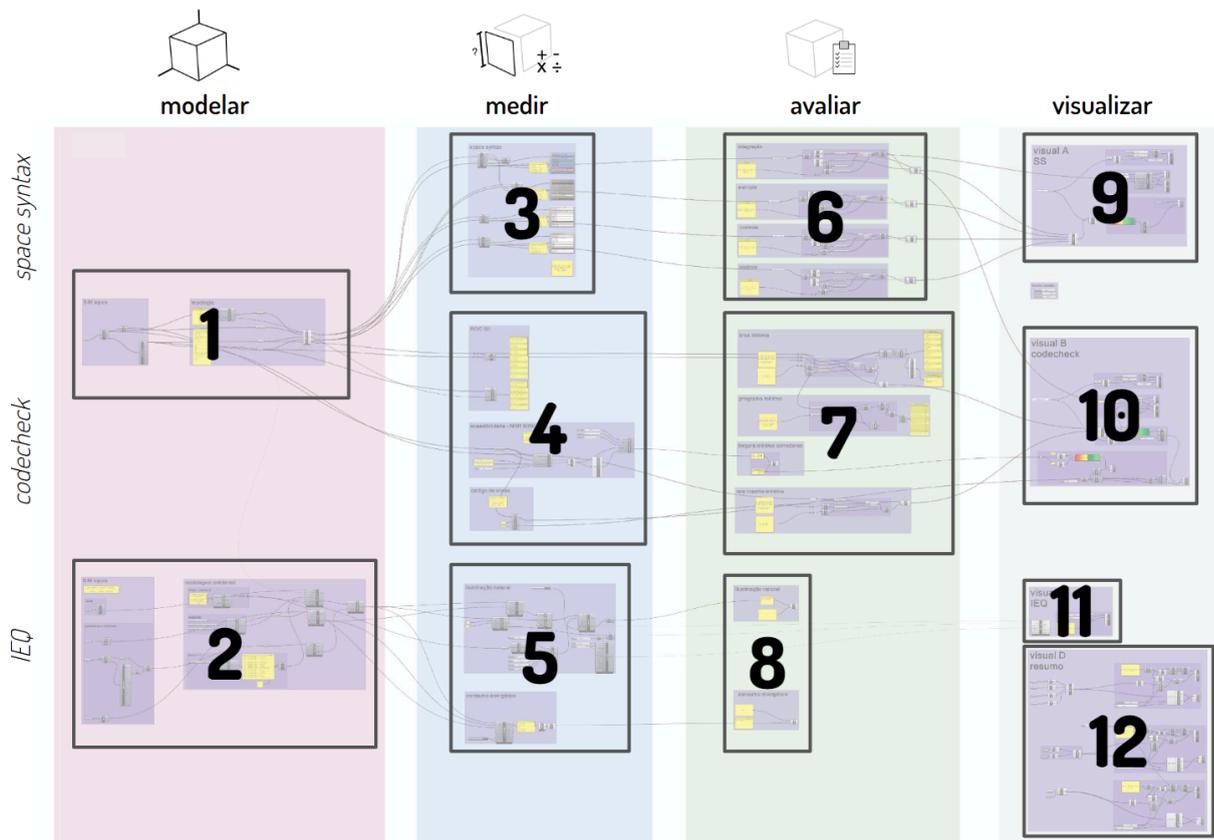
WOODBURY, Robert. (2010). *Elements of Parametric Design*. London ; New York, NY: Routledge.

ZHANG, Z., NISBET, N., MA, L., & BROYD, T. (2023). Capabilities of rule representations for automated compliance checking in Healthcare Buildings. *Automation in Construction*, 146, 104688.

APÊNDICES

A1. DOCUMENTAÇÃO DO ALGORITMO

Figura 28 - Estrutura geral do algoritmo, dividida em 12 recortes. Cada recorte é ampliado e explicado a seguir.



Fonte - Autor, 2023.

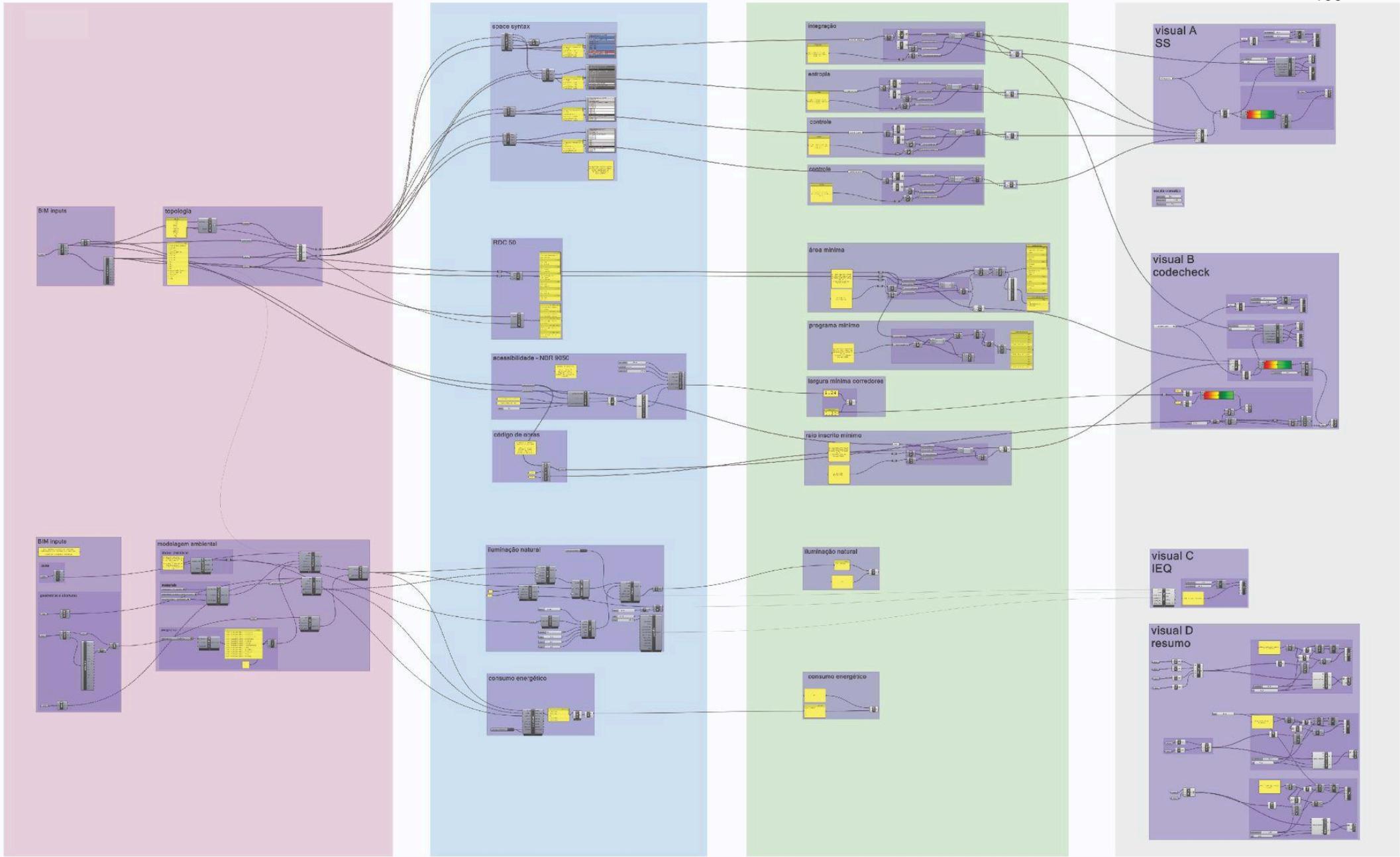
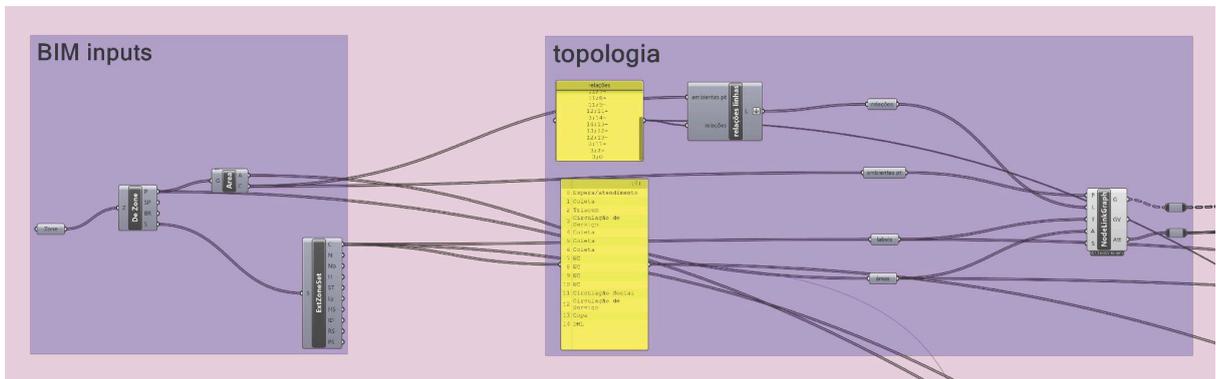
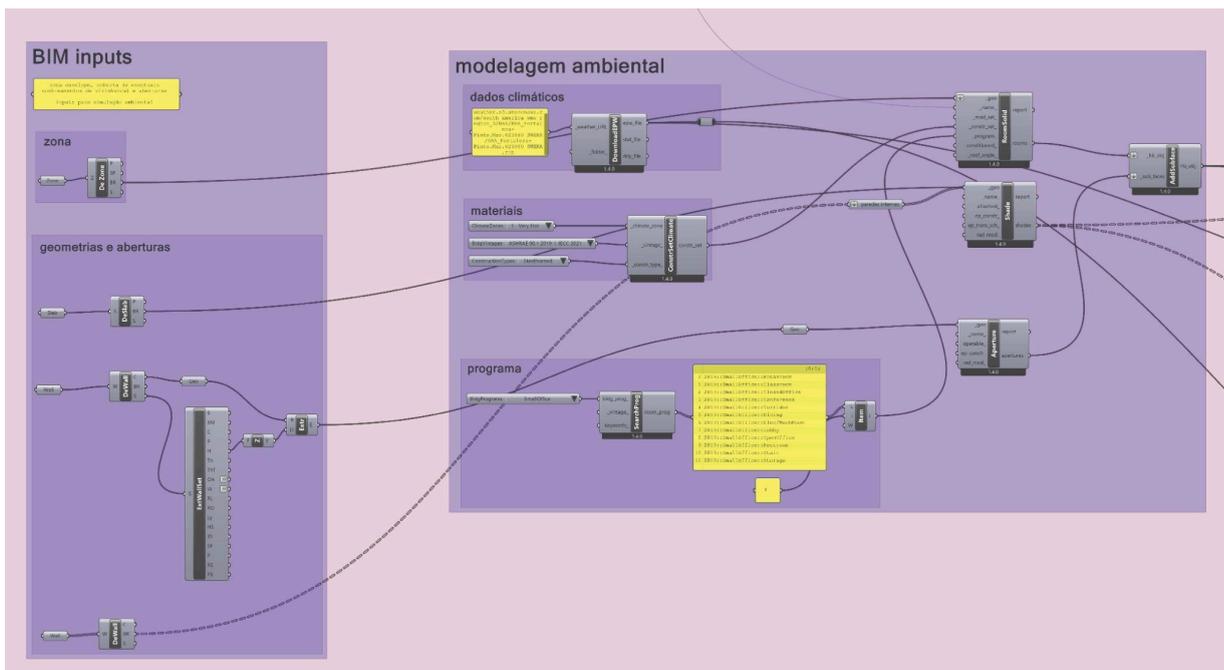


Figura 30 - Recorte 1 do algoritmo, responsável pela importação de dados BIM de zonas, e inserção de dados do programa arquitetônico: as relações topológicas.



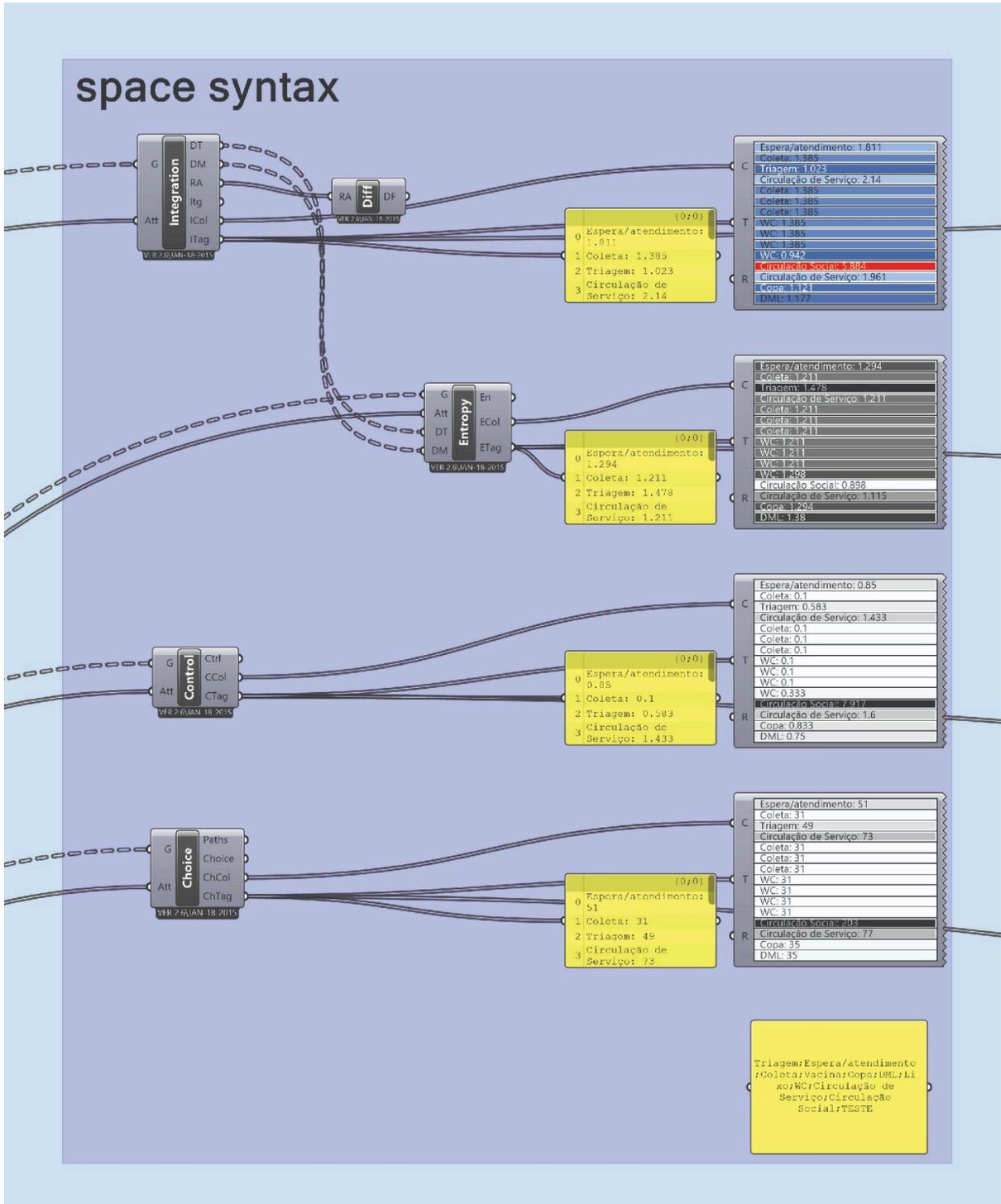
Fonte - Autor, 2023.

Figura 31 - Recorte 2 do algoritmo, responsável pela modelagem ambiental para simulação. Para isso são importados elementos arquitetônicos BIM, e configurada modelagem ambiental com dados de clima, de material e de rotina programática.



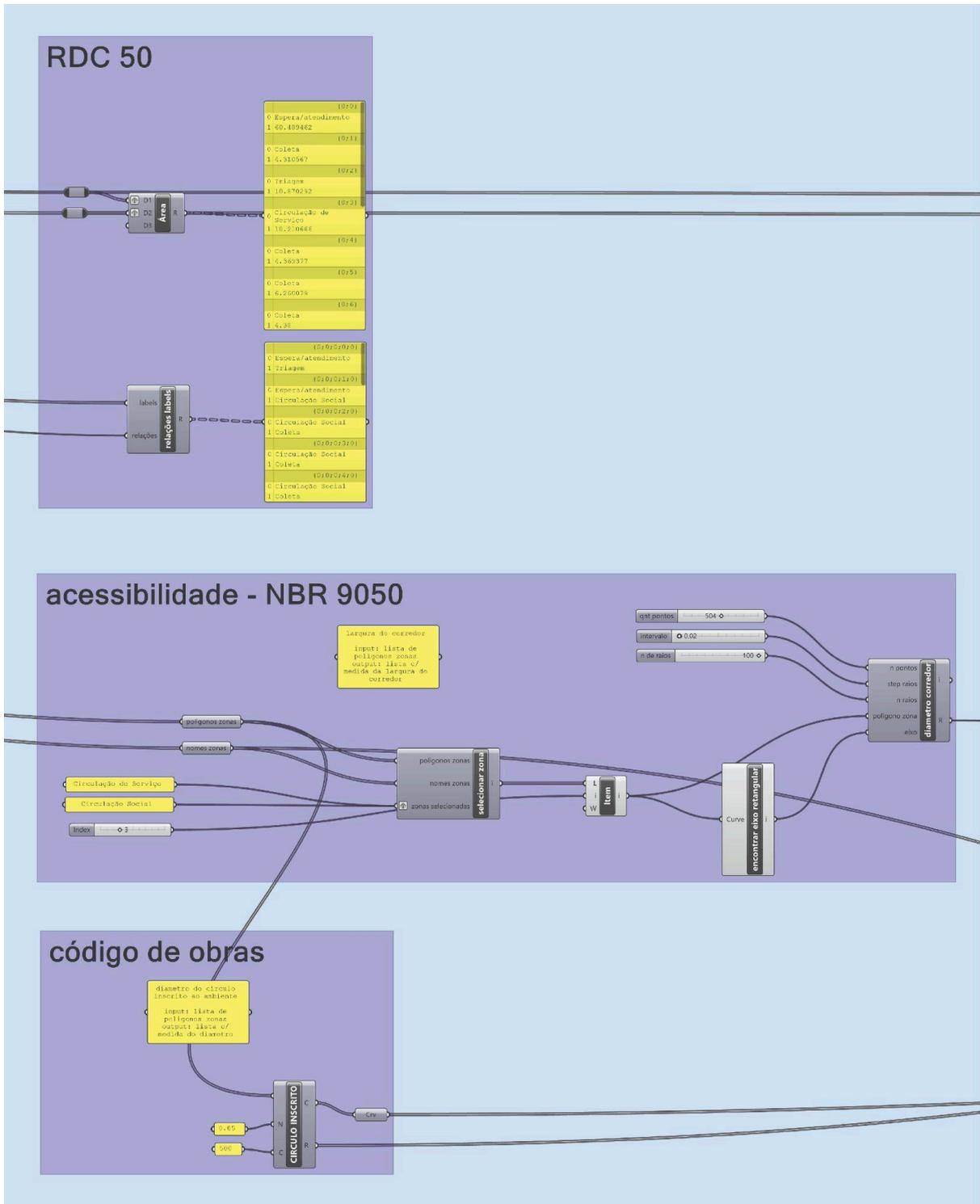
Fonte - Autor, 2023.

Figura 32 - Recorte 3 do algoritmo, responsável pela medição dos indicadores da sintaxe espacial utilizando o pacote Syntactic.



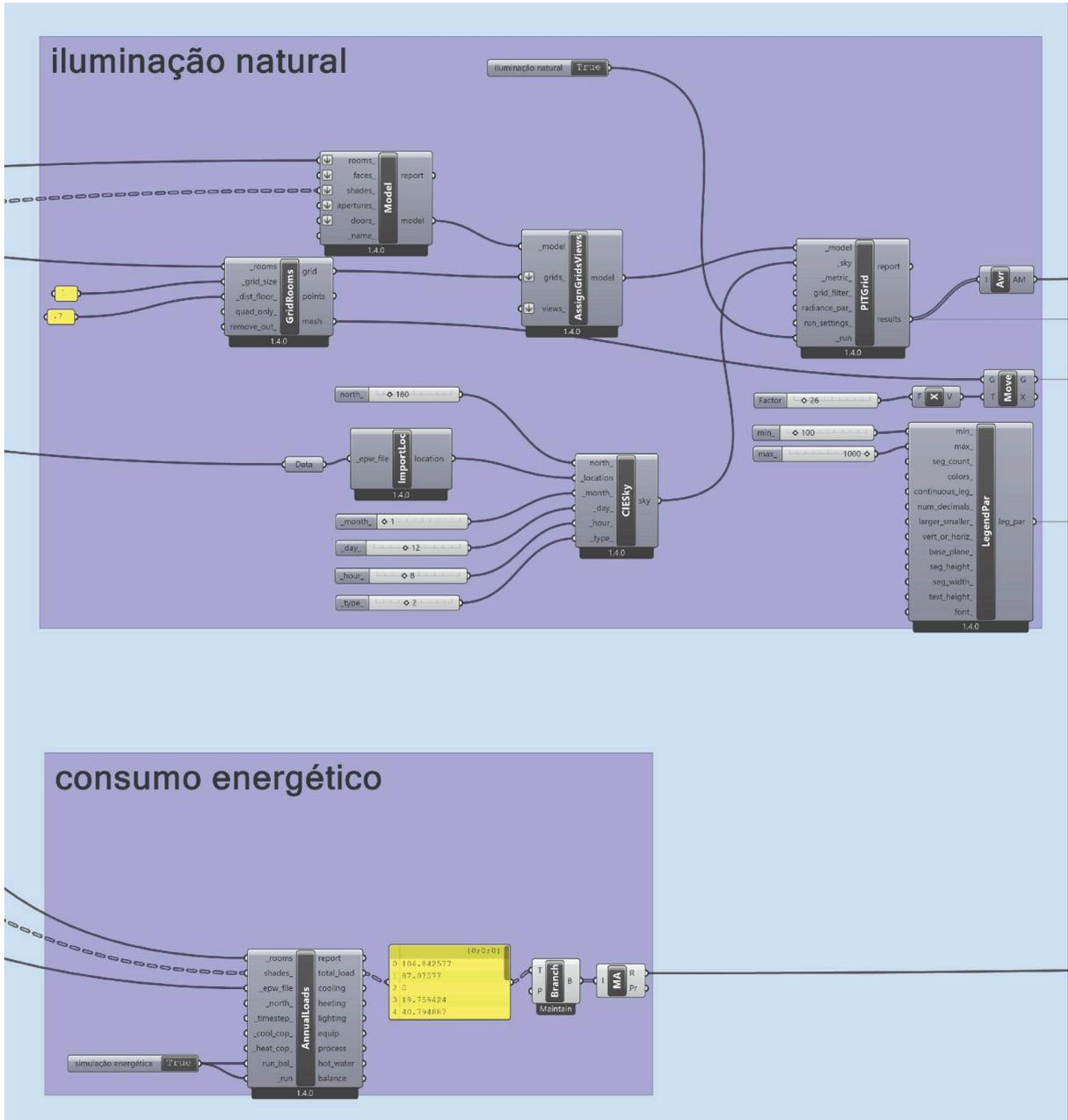
Fonte - Autor, 2023.

Figura 33 - Recorte 4 do algoritmo, responsável pela medição dos indicadores normativos utilizando componentes do Grasshopper. Foram construídos alguns clusters para servirem de módulos de medição.



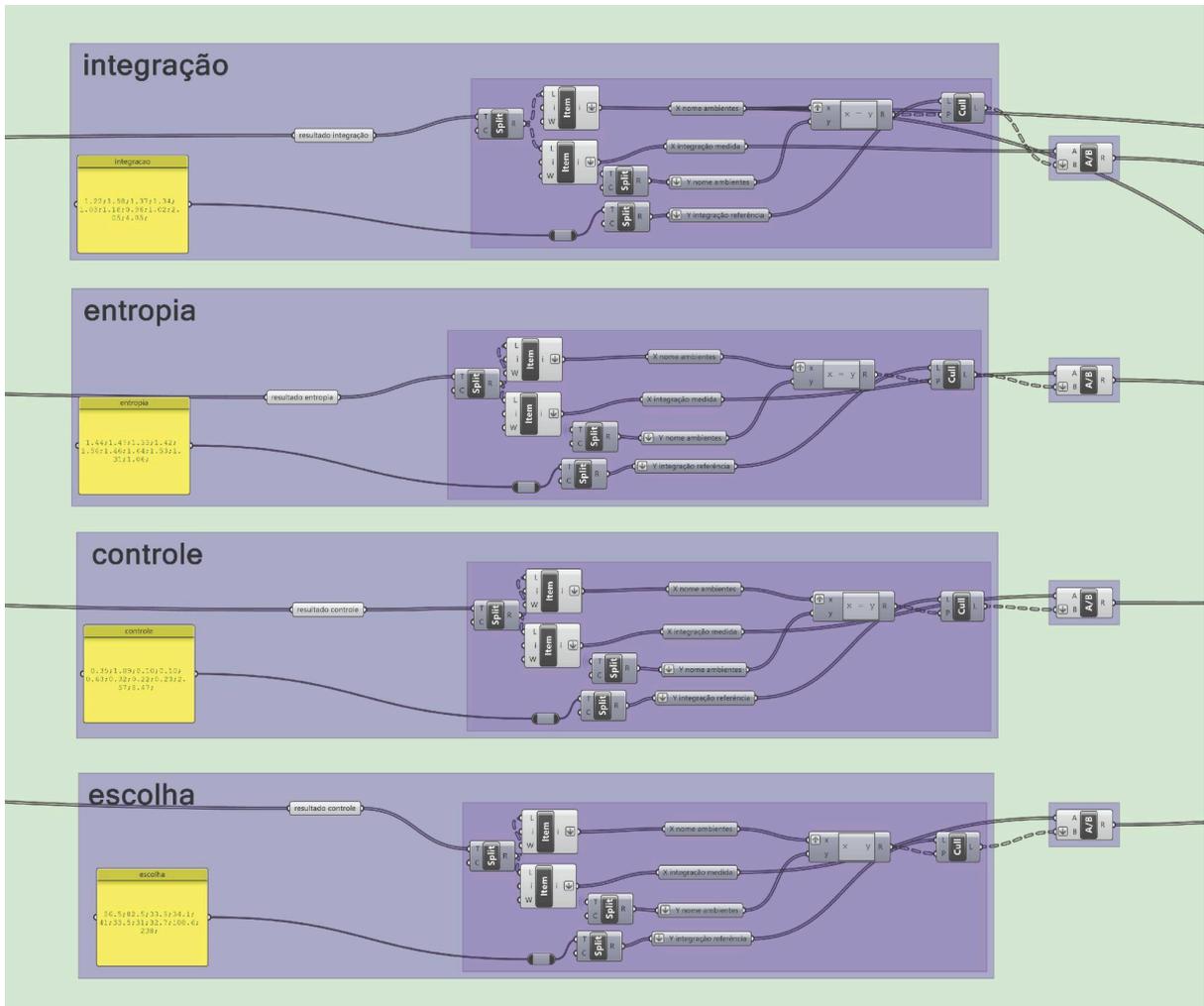
Fonte - Autor, 2023.

Figura 34 - Recorte 5 do algoritmo, responsável pela medição dos indicadores IEQ utilizando componentes dos plugins Ladybug e Honeybee para Grasshopper.



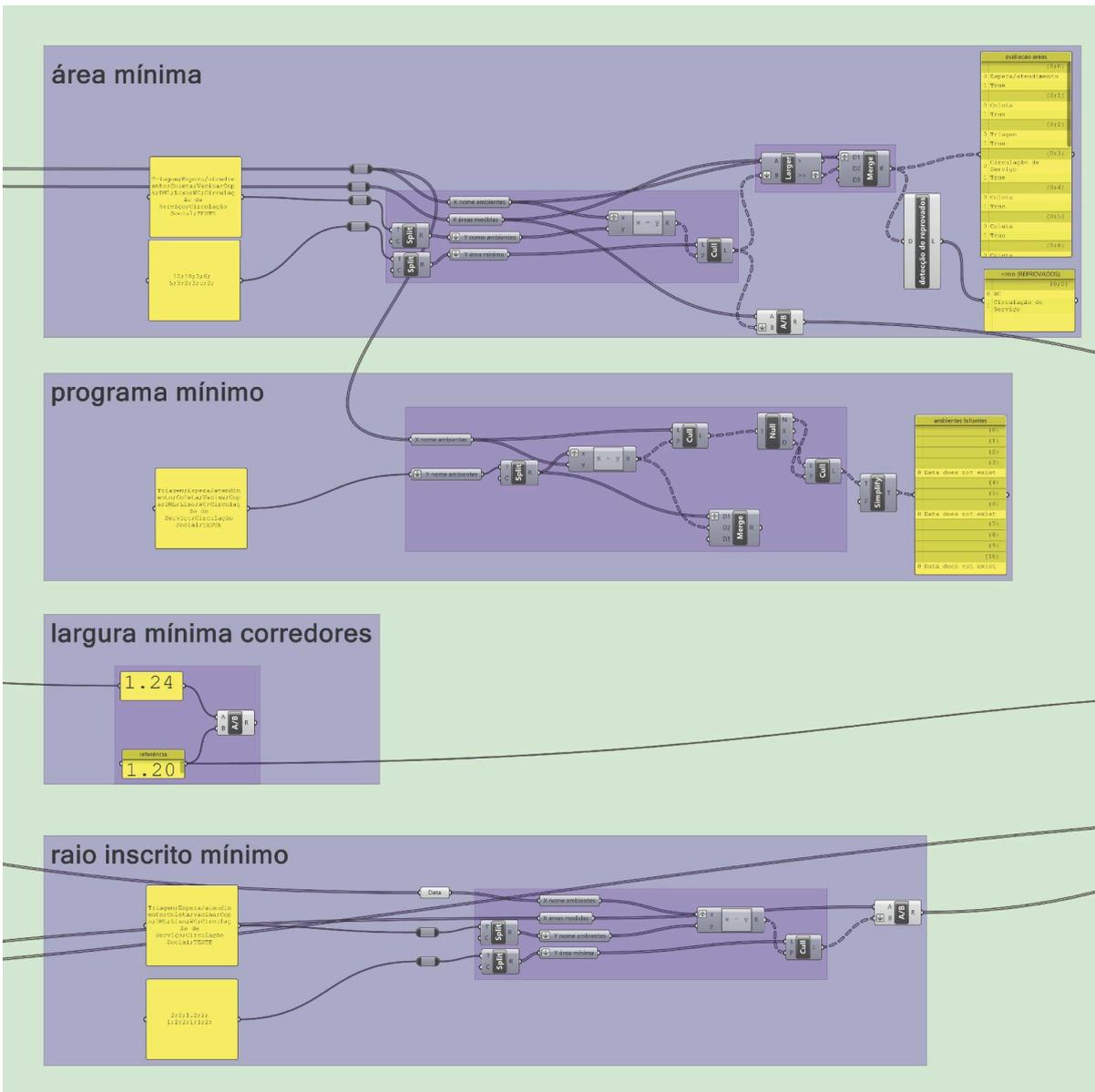
Fonte - Autor, 2023.

Figura 35 - Recorte 6 do algoritmo, responsável pela avaliação dos indicadores da sintaxe espacial, comparando os valores medidos com os valores de referência. A comparação é feita por meio de divisão: se o valor é igual a referência a avaliação resulta em 1.



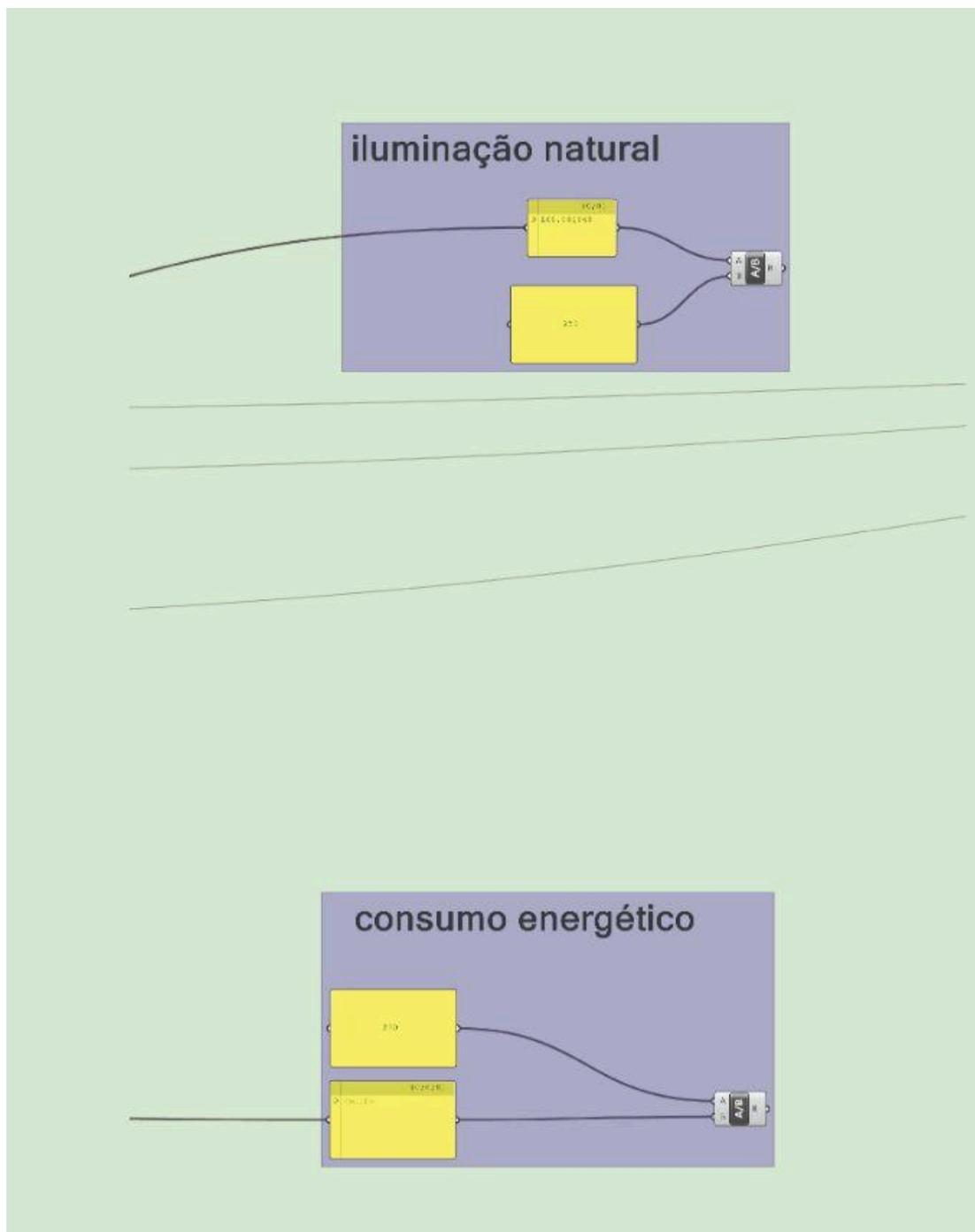
Fonte - Autor, 2023.

Figura 36 - Recorte 7 do algoritmo, responsável pela avaliação dos indicadores normativos, comparando os valores medidos com os valores de referência. Nas normas quantitativas, a comparação é feita por meio de divisão: se o valor é igual a referência a avaliação resulta em 1. Na norma qualitativa (programa mínimo), o resultado é uma lista dos ambientes ausentes.



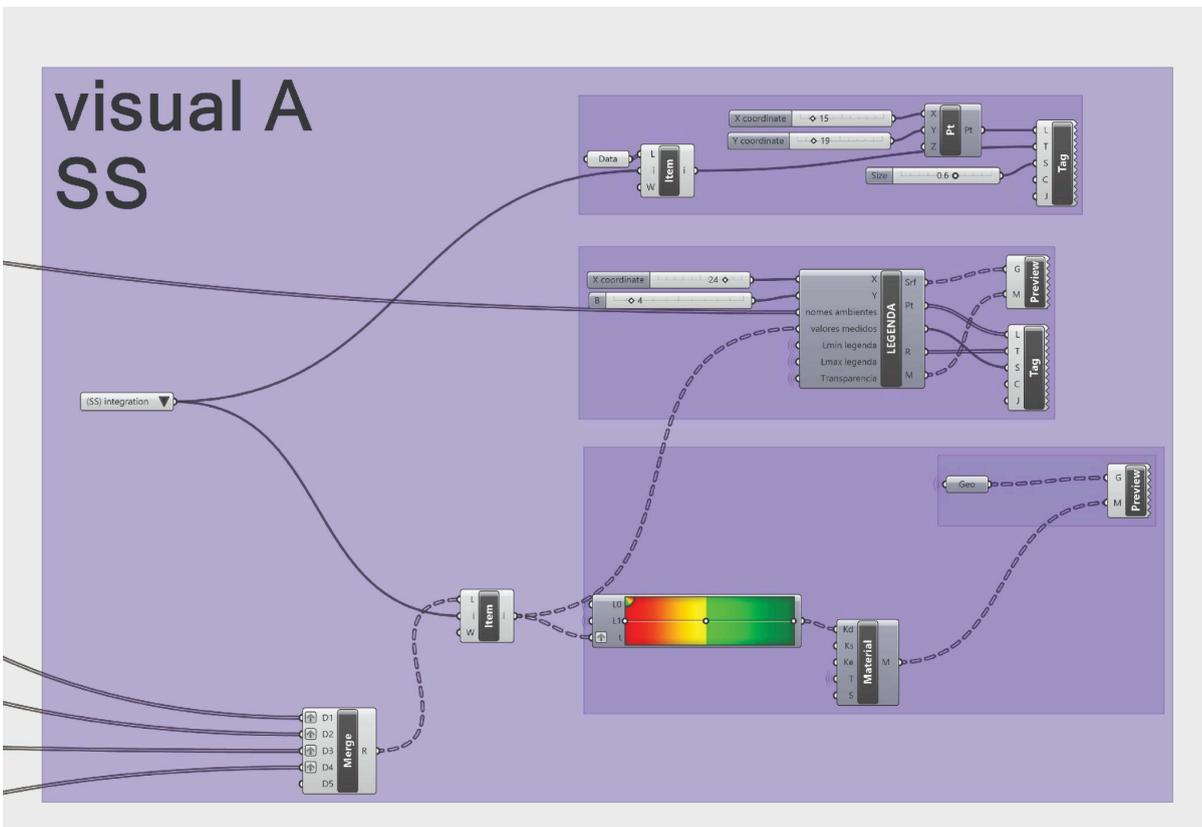
Fonte - Autor, 2023.

Figura 37 - Recorte 8 do algoritmo, responsável pela avaliação dos indicadores IEQ medidos por meio de simulação ambiental, comparando os valores medidos com os valores de referência.



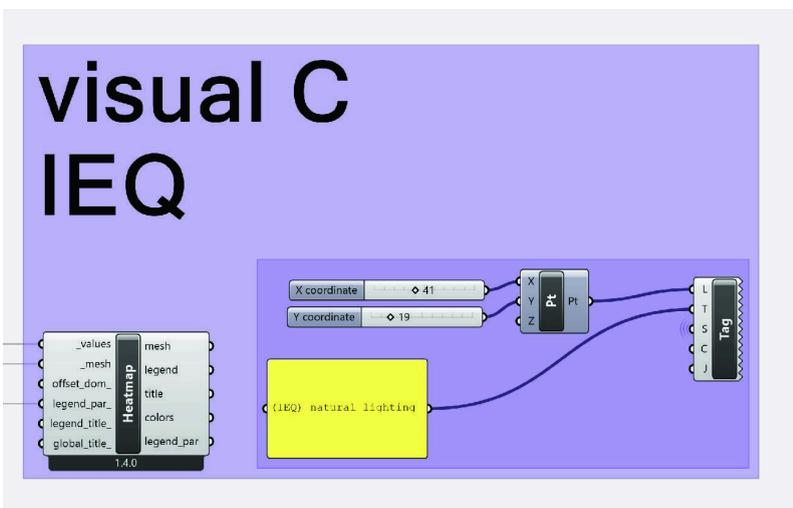
Fonte - Autor, 2023.

Figura 38 - Recortes 9 e 10 do algoritmo, responsáveis pela visualização dos indicadores da sintaxe espacial e adequabilidade normativa, respectivamente. Um botão/menu contém as opções de diferentes indicadores para visualização. Esse visual é composto por três camadas: o título, a legenda e a planta. Os valores da avaliação são dispostos em uma escala cromática paramétrica, que é representada na legenda e na planta.



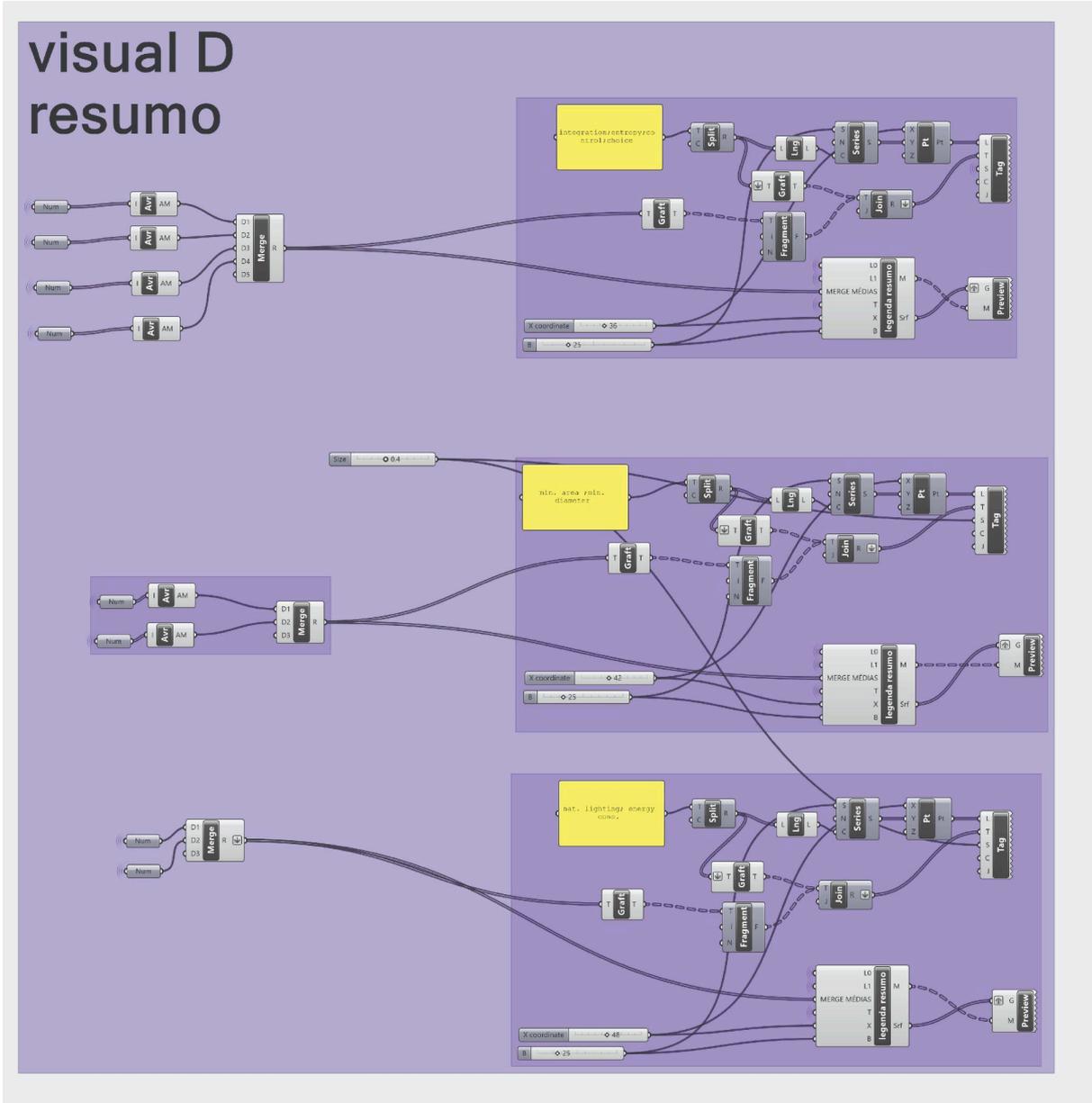
Fonte - Autor, 2023.

Figura 39 - Recorte 11 do algoritmo, responsável pela visualização do indicador de iluminação natural, disposto em planta. O visual conta também com um título e uma legenda.



Fonte - Autor, 2023.

Figura 40 - Recorte 12 do algoritmo, responsável pela visualização de diversos indicadores de maneira simplificada. O visual mostra a avaliação média de todos os ambientes para indicadores. Ela cria disposição dos dados em “tile graph”, e cada célula conta com o nome, valor do indicador e uma representação cromática.



Fonte - Autor, 2023.

A2. MEMORIAL DE CÁLCULO DOS INDICADORES

Tabela 14 - Indicadores implementados na ferramenta.

temática	indicador	referência	como é medido
configuração espacial	integração	Nourian, (2016)	foi utilizado o componente “Integration”, do plugin SYNTACTIC para Grasshopper. $I = \frac{D_k(k-2)(k-1)}{2(TD-k+1)}$ $D_k = \frac{2\left(k\left(\log_2\left(\frac{(k+2)}{3}\right)-1\right)+1\right)}{(k-1)(k+1)}$
configuração espacial	entropia	(Nourian, 2016)	foi utilizado o componente “Entropy”, do plugin SYNTACTIC para Grasshopper. $S_i = - \sum_{d=1}^{d_{max}} P_d \log_2 P_d$
configuração espacial	controle	(Nourian, 2016)	foi utilizado o componente “Control”, do plugin SYNTACTIC para Grasshopper, $Control = \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i}$
configuração espacial	escolha	(Nourian, 2016)	foi utilizado o componente “Choice”, do plugin SYNTACTIC para Grasshopper. $C_B(P_i) = \sum_j \sum_k \frac{\sigma_{jk}(P_i)}{\sigma_{jk}} (j < k)$
IEQ	consumo energético para conforto	Ncube & Riffat, (2012)	foi utilizado o componente “Annual Loads” do plugin HONEYBEE para Grasshopper
IEQ	iluminação natural	Chiang & Lai (2001)	foi utilizado o componente “Point In Time Grid” do plugin HONEYBEE para Grasshopper
normas e códigos	programa mínimo	RDC 50	listagem de ambientes
normas e códigos	área mínima	RDC 50	mensuração da área
normas e códigos	largura mínima de corredores	Código de obras	teste de maior círculo possível inscrito ao longo do eixo do corredor
normas e códigos	círculo inscrito mínimo	NBR 9050	teste de maior círculo possível inscrito com centro no centróide do ambiente

Fonte - Autor, 2023.

A3. TABELAS DE REFERÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DOS INDICADORES

Tabela 15 - Indicadores implementados na ferramenta.

temática	indicador	origem da referência	valores de referência
configuração espacial	integração	média por ambiente medida nos edifícios modelados	Circulação de Serviço: 2051,2 Circulação Social: 4852,25 Coleta: 1378,875 Consultório: 1308 Copa: 1039,75 DML: 1163 Espera/atendimento: 1584,25 Lixo: 969 Triagem: 1227,75 Vacina: 1347,429 WC: 1024,714
configuração espacial	entropia	média por ambiente medida nos edifícios modelados	Circulação de Serviço: 1305,8 Circulação Social: 1058 Coleta: 1334,875 Consultório: 1272 Copa: 1562 DML: 1467,25 Espera/atendimento: 1475 Lixo: 1642 Triagem: 1441,75 Vacina: 1420,286 WC: 1530,5
configuração espacial	controle	média por ambiente medida nos edifícios modelados	Circulação de Serviço: 25676 Circulação Social: 84667,5 Coleta: 977,5 Consultório: 1110 Copa: 6332,5 DML: 3207,5 Espera/atendimento: 18860 Lixo: 2250 Triagem: 3470 Vacina: 990 WC: 2257,143
configuração espacial	escolha	média por ambiente medida nos edifícios modelados	Circulação de Serviço: 10860 Circulação Social: 23800 Coleta: 3350 Consultório: 2900 Copa: 4100 DML: 3350 Espera/atendimento: 8250 Lixo: 3100 Triagem: 5650 Vacina: 3414,286 WC: 3271,429
IEQ	consumo energético para conforto	média do consumo energético de 12 meses pós-ocupação	edifício DL: 12,8 kWh/m ² edifício E: 12,07 kWh/m ² edifício DL: 12,3 kWh/m ²

IEQ	iluminação natural	Ferrante e Villani (2022) SOMASUS	luz geral: 120lx examinação: 250lx 150 a 300 lux-geral/300 a 750 lux – junto à mesa para exames.
normas e códigos	programa mínimo	RDC 50	Coleta Atendimento (área de registro) Triagem (sala para classificação) Sala de espera WC funcionário WC cliente DML Copa
normas e códigos	área mínima	RDC 50	Circulação de Serviço: (largura na NBR 9050) Circulação Social: (largura na NBR 9050) Coleta: 3,6m ² Consultório: 7,5m ² Copa: 2,6m ² DML: 2m ² Espera/atendimento: 1,2 m ² por cadeira Lixo: 2 m ² (depende do plano de resíduos) Triagem: 3m ² Vacina: 6m ² WC: 2,55m ² (NBR 9050)
normas e códigos	largura mínima de corredores	NBR 9050	1,2m
normas e códigos	diâmetro do círculo inscrito mínimo	Código de obras	WC: 1,00m Hall: 2,00m Corredores: 1,2m Escadas: 1,20m

Fonte - Autor, 2023.

A4. FORMULÁRIO DE VALIDAÇÃO

Facilidade de navegação

1. É fácil de encontrar as informações necessárias nas telas da interface.
 - a. Discordo totalmente
 - b. Discordo
 - c. Neutro
 - d. Concordo
 - e. Concordo totalmente
2. A organização das informações facilita a navegação.
 - a. Discordo totalmente
 - b. Discordo
 - c. Neutro
 - d. Concordo
 - e. Concordo totalmente
3. Comentários e sugestões.

Clareza das informações

1. As informações apresentadas são claras e compreensíveis.
 - a. Discordo totalmente
 - b. Discordo
 - c. Neutro
 - d. Concordo
 - e. Concordo totalmente
2. Você teve dificuldade para entender alguma parte da interface?

Usabilidade geral

1. A interface atende às suas necessidades de forma eficiente.
 - a. Discordo totalmente
 - b. Discordo
 - c. Neutro
 - d. Concordo
 - e. Concordo totalmente
2. Quais recursos da interface você considera mais úteis?

3. Comentários e sugestões.

Feedback visual

1. A interface fornece feedback visual suficiente para suas ações.
 - a. Discordo totalmente
 - b. Discordo
 - c. Neutro
 - d. Concordo
 - e. Concordo totalmente
2. Você se sente orientado(a) sobre o que está acontecendo visualmente na interface.
 - a. Discordo totalmente
 - b. Discordo
 - c. Neutro
 - d. Concordo
 - e. Concordo totalmente
3. Comentários e sugestões.

Design e estética

1. O design da interface é atraente e visualmente agradável.
 - a. Discordo totalmente
 - b. Discordo
 - c. Neutro
 - d. Concordo
 - e. Concordo totalmente
2. Há algum aspecto visual que você acredita que poderia ser melhorado?

Personalização e recursos adicionais

1. O que você gostaria de personalizar nos visuais de acordo com suas preferências?
2. Que funcionalidades adicionais seriam úteis para você?
3. Existem recursos adicionais que você gostaria de ver nesta interface?
4. Você encontrou algum problema específico na interface? Se sim, poderia descrever esse problema?

A5. FORMULÁRIO PÓS-OCUPAÇÃO

O questionário que segue é composto por perguntas sobre sua percepção do espaço da unidade em que você trabalha. Queremos entender como os ambientes são dispostos nesta unidade. No questionário você vai encontrar afirmações relacionadas a como os ambientes são distribuídos, e gostaríamos que você assinalasse sua opinião com base na sua experiência. Se o ambiente não existe na sua unidade, favor não marcar nada e seguir para próxima página (ex: consultório). Cada página do formulário é sobre um ambiente, pedimos para que você siga até o final. Obrigado por colaborar com a pesquisa!

Instruções: Por favor, avalie as características desse ambiente com base em sua experiência. Use a escala de 1 a 5, onde 1 representa "Discordo Totalmente" e 5 representa "Concordo Totalmente".

1. Integração

Descrição: A Integração é o quão fácil transitar entre diferentes áreas do edifício. Ambientes integrados tem portas e passagens de acesso para outros ambientes.

Você concorda que esse espaço é integrado com outras áreas e é fácil de se deslocar para os outros ambientes do edifício?

2. Isolamento

Descrição: O isolamento descreve um ambiente com poucas portas e passagens. Ou seja, quando um ambiente é isolado, é mais difícil de chegar em outros espaços a partir desse espaço.

Você concorda que esse espaço é isolado e tem poucos ambientes que são acessados a partir dele?

3. Conectividade

Descrição: Um ambiente conectado tem vários caminhos para acessá-lo.

Você concorda que esse espaço é conectado e existem várias formas de chegar nele?