

BRENO TISI MENDES DA VEIGA

**A implementação da simulação de desempenho lumínico auxiliada pela
modelagem paramétrica no processo de projeto de uma empresa de
arquitetura**

São Paulo

2021

BRENO TISI MENDES DA VEIGA

**A implementação da simulação de desempenho lumínico auxiliada pela
modelagem paramétrica no processo de projeto de uma empresa de
arquitetura**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Projetos na Construção.

Área de Concentração: Gestão de Projetos na Construção.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Burrattino Melhado.

São Paulo

2021

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

Catálogo-na-publicação

Veiga, Breno Tisi Mendes da

A implementação da simulação de desempenho lumínico auxiliada pela modelagem paramétrica no processo de projeto de uma empresa de arquitetura / B. T. M. Veiga -- São Paulo, 2021.

143 p.

Monografia (Especialização em Gestão de Projetos na Construção) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Poli-Integra.

1.Inovação 2.Implementação 3.Desempenho 4.Modelagem Paramétrica
5.Grasshopper I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Poli-Integra
II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Silvio Melhado, pelo incentivo e apoio, pelas valiosas orientações, pela parceria nesta pesquisa e por fomentar minha paixão pela pesquisa acadêmica.

Ao Prof. Leonardo Manzione, pelas excelentes aulas e por incentivar o desenvolvimento desta pesquisa. Aos demais professores e funcionários da pós-graduação em Gestão de Projetos na Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

À empresa de arquitetura, que completa 50 anos em 2021, um lugar que fomenta a inovação, feito por pessoas inspiradoras e que cada vez mais *“contribui para que pessoas apaixonadas por arquitetura se realizem transformando intenções em espaços que enriqueçam a experiência de viver”*.

Ao CEO da empresa de arquitetura, pelas ótimas conversas sobre gestão organizacional e por permitir a realização desta pesquisa. Aos Diretores, Gerentes, Líderes de Projeto e arquitetos da empresa de arquitetura, pelos depoimentos concedidos a esta pesquisa.

Aos membros da equipe de tecnoestrutura da empresa que participaram da implementação das simulações de desempenho lumínico, e que desempenharam papel fundamental para esta pesquisa. Ao BIM *Manager*, pelo apoio, pelos ensinamentos sobre desempenho, sustentabilidade, iluminação, simulação e Archicad. Ao Engenheiro de Sistemas Digitais, pelo grande auxílio na criação do algoritmo de simulação e pelos ensinamentos sobre programação.

Aos amigos e colegas da POLI e da empresa de arquitetura, pela troca de experiências e apoio.

É preciso experimentar. Houve muitas mudanças para que alguém se permita continuar ancorado em velhas tecnologias. No momento em que você concorda que uma arquitetura é o espelho de uma sociedade, é preciso reconhecer também que ela é o espelho do momento de uma cultura; não se entende por que, se tudo mudou – o comportamento das pessoas, da sociedade, os instrumentos a disposição –, você deva permanecer imóvel. Você precisa mudar, por força você é impelido a inventar. São essas as múltiplas razões pelas quais, como dizíamos, o arquiteto deve reprojeter-se.

Renzo Piano

(PIANO, 2011. p. 24)

RESUMO

Novas tecnologias surgem como opção para resolver problemas, sanar limitações e suprir necessidades. Quando incorporadas ao processo de projeto de empresas de arquitetura, podem melhorar a qualidade técnica dos projetos e ampliar a competitividade da empresa. Projetos do setor da construção civil têm se tornado cada vez mais complexos; na contemporaneidade diversas tecnologias foram desenvolvidas com a finalidade de solucionar adversidades relativas à complexidade das construções. O desenvolvimento de simulações visando o desempenho na fase inicial do projeto promove a detecção e a resolução antecipadas de possíveis problemas futuros e a redução dos riscos envolvendo o não atendimento às normas de desempenho. Esta pesquisa investigou o processo de implementação da simulação visando o desempenho lumínico natural por meio da modelagem paramétrica no processo de projeto de uma empresa de projetos arquitetônicos. Embora haja diversas pesquisas sobre o uso de ferramentas de modelagem paramétrica e de simulação digital, poucas analisam os procedimentos necessários para implementar essas tecnologias no processo de projeto de empresas de arquitetura. O método de implementação desenvolvido, embasado na convergência entre Tecnologia, Processo, Pessoas e Gestão (TPPG) possibilitou a incorporação das simulações de desempenho lumínico no processo de projeto da empresa, como ferramenta de análise e decisão; favoreceu a compreensão sobre desempenho lumínico aos colaboradores da empresa; aprimorou a qualidade ambiental dos projetos da empresa; reduziu os riscos associados ao não atendimento das normas de desempenho, reduziu a dependência de consultores externos e promoveu vantagem competitiva para a empresa.

Palavras-chave: Inovação; Implementação; Desempenho; Modelagem Paramétrica; Grasshopper.

ABSTRACT

New technologies appear as an option to clarify problems, solve limitations and meet demands. When incorporated into the design process of architectural firms, they may improve the technical quality of a project and enhance the company's competitiveness. Projects in the civil construction sector have become increasingly complex. Nowadays, several technologies have been developed with the purpose of solving difficulties related to the complexity of constructions. The development of performance simulations in the initial phase of the project promotes the early detection and resolution of potential future problems and reduces risks related to infringement of performance standards. This research explored the implementation process of daylight performance simulations through parametric modeling in the design process of an architectural design company. Although there is a considerable number of research on the use of parametric modeling and digital simulation tools, few investigate the procedures necessary to implement these technologies in the design process of architectural firms. The developed implementation method, based on the convergence of Technology, Process, People and Management (TPPM), enabled the incorporation of daylight performance simulations in the company's design process, as an analysis and decision tool; favored the understanding of daylight performance among the company's employees; improved the environmental quality of the company's projects; reduced the risks associated with the infringement of performance standards, reduced the dependence on external consultants and promoted the company's competitiveness.

Keywords: Innovation; Implementation; Performance; Parametric Modeling; Grasshopper.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa Mental da Pesquisa.....	23
Figura 2 – Método de implementação proposto	25
Figura 3 – Fontes de luz natural que alcançam o edifício	34
Figura 4 – Plano de análise e ponto central em um ambiente típico	35
Figura 5 – Algoritmo em linguagem Python e forma resultante.....	42
Figura 6 – Algoritmo desenvolvido no Grasshopper.....	44
Figura 7 – Variações na forma da cobertura do Centro Olímpico de Hangzhou	48
Figura 8 – Modelo organizacional proposto por Mintzberg (2009)	65
Figura 9 – Estrutura organizacional da empresa analisada	67
Figura 10 – Processo de projeto anterior à implementação	70
Figura 11 – Processo de projeto proposto	72
Figura 12 – Diagrama explicativo do Algoritmo	75
Figura 13 – Algoritmo desenvolvido	76
Figura 14 – Testes com diferentes configurações de resolução e rebatimentos.....	79
Figura 15 – Processo de criação das superfícies de análise	83
Figura 16 – Softwares e ferramentas utilizadas na implementação	84
Figura 17 – Processo de implementação	85
Figura 18 – Modelagem Archicad.....	86
Figura 19 – Perspectiva do modelo na <i>interface</i> do Archicad	87
Figura 20 – Perspectiva do 1º Pavimento da torre A do projeto.....	88
Figura 21 – Perspectiva do modelo na <i>interface</i> do Rhinoceros	88
Figura 22 – Modelagem Rhinoceros	89
Figura 23 – Seção do 1º Pavimento exibida na <i>interface</i> do Rhinoceros.....	90
Figura 24 – Definição dos Parâmetros de Simulação	91
Figura 25 – Simulação	92
Figura 26 – Resultado das simulações de desempenho lumínico.....	93
Figura 27 – Análise dos Resultados.....	94
Figura 28 – Definição das Alternativas de Projeto.....	94
Figura 29 – Sumário e capa do Manual para execução das análises de iluminação	96
Figura 30 – Sumário e capa do Guia de iluminação.....	97
Figura 31 – Estrutura organizacional da empresa analisada a partir de 2021	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de iluminação de acordo com a Norma de Desempenho.....	33
Tabela 2 – Definição dos valores para cada parâmetros de projeto	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Requisitos e formas de verificação do desempenho lumínico natural.	33
Quadro 2 – Parâmetros de controle de luz e ambiente utilizados no Radiance	77
Quadro 3 – Vantagens e limitações da tecnologia empregada	110
Quadro 4 – Vantagens e limitações do processo proposto	111
Quadro 5 – Vantagens e limitações do processo executado pelas pessoas.....	115
Quadro 6 – Vantagens e limitações da implementação proposta	117

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quantitativo dos colaboradores da empresa por área de atuação	69
Gráfico 2 – Comparativo dos resultados obtidos nos 16 testes.....	80
Gráfico 3 – Comparativo do tempo de processamento nos 16 testes	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação
API	<i>Application Programming Interface</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAU	Conselho de Arquitetura e Urbanismo
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CC	Componente do Céu
CIN	Contribuição de Iluminação Natural
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CRE	Componente Refletida Externa
CRI	Componente Refletida Interna
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
MP	Modelagem Paramétrica
NBR	Norma Brasileira
NURBS	<i>Non-Uniform Rational Basis Spline</i>
TIC	Tecnologia da Informação para a Construção
TPPG	Tecnologia, Processo, Pessoas e Gestão
VDI	<i>Virtual Desktop Infrastructure</i>
VPL	<i>Visual Programming Language</i>
WIP	<i>Work in Progress</i>
WSL	<i>Windows Subsystem for Linux</i>

SUMÁRIO

1	Introdução	16
1.1	Apresentação do Tema.....	16
1.2	Objetivos.....	22
1.3	Estudo de Caso	22
1.4	Mapa Mental da Pesquisa	23
1.5	Método de Implementação - TPPG	24
1.5.1	Tecnologia.....	25
1.5.2	Processo	26
1.5.3	Pessoas	26
1.5.4	Gestão.....	27
1.6	Estrutura da Monografia	28
2	Revisão Bibliográfica.....	29
2.1	Desempenho	29
2.1.1	NBR 15575.....	31
2.1.1.1	Requisitos para o Desempenho Lumínico	32
2.1.1.2	Método para Avaliação do Desempenho Lumínico	34
2.1.2	Outras abordagens.....	36
2.1.2.1	Sustentabilidade	37
2.1.2.2	Biomimética	38
2.2	Arquitetura na Era Digital.....	39
2.2.1	Algoritmos	41
2.2.2	Linguagens de Programação Visual.....	43
2.2.3	Modelagem Paramétrica	45
2.2.4	Simulação Digital.....	49
3	Estudo de Caso.....	56

3.1 Caracterização da Empresa	56
3.1.1 Histórico	57
3.1.2 Implementação da Gestão de Mudanças	59
3.1.2.1 Tecnologia BIM.....	61
3.1.2.2 Desafios e Dificuldades	62
3.1.2.3 Considerações Parciais	63
3.2 Estrutura Organizacional – Modelo de Mintzberg	64
3.3 Estrutura Organizacional da Empresa	67
3.4 Processo de Projeto Anterior à Implementação.....	70
3.5 Processo de Projeto Proposto	71
4 Implementação.....	73
4.1 Tecnologia	73
4.1.1 Algoritmo	74
4.1.2 Interoperabilidade entre Softwares.....	82
4.2 Processo.....	84
4.2.1 Subprocessos	85
4.2.1.1 Modelagem Archicad	86
4.2.1.2 Modelagem Rhinoceros.....	89
4.2.1.3 Definição dos Parâmetros de Simulação.....	90
4.2.1.4 Simulação	92
4.2.1.5 Análise dos Resultados	94
4.2.1.6 Definição das Alternativas de Projeto	94
4.3 Pessoas	95
4.3.1 Documentos de Apoio	96
4.3.2 Apresentações do Método de Implementação e do Material de Apoio	98
4.3.2.1 Apresentação aos Líderes de Projeto.....	98
4.3.2.2 Apresentação à primeira equipe de projeto	99

4.3.2.3 Apresentação aos demais colaboradores.....	102
4.4 Gestão	103
5 Discussão.....	107
5.1 Tecnologia	109
5.2 Processo.....	111
5.3 Pessoas	114
5.4 Gestão	117
6 Considerações Finais	120
6.1 Contratempos durante a Implementação.....	121
6.1.1 Adversidades Técnicas e Operacionais	122
6.1.2 Mudança Organizacional na Empresa Analisada.....	125
6.2 Futuras Revisões do Processo Proposto.....	127
6.3 Futuras Pesquisas	128
Referencial Bibliográfico.....	129
Apêndice A – Relatos dos Gerentes de Projeto	138
Gerente de Projeto A	138
Gerente de Projeto B	139
Apêndice B – Relato de um Líder de Projeto	140
Apêndice C – Relato de um Arquiteto da Empresa	141

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

Em 2020, o mundo foi impactado por uma pandemia que afetou diretamente o modo de viver e trabalhar. Um levantamento feito pela imobiliária Quinto Andar e publicado pelo jornal “*O Estado de São Paulo*” demonstra um novo perfil de consumo para o mercado imobiliário paulistano (ZANATA, 2020).

O levantamento aponta que a procura por apartamentos do tipo *kitchenette* na cidade de São Paulo caiu 10% nos três primeiros meses de pandemia; em contrapartida, a busca por apartamentos mais amplos, de dois ou mais dormitórios, teve alta de 30% no mesmo período.

A mesma matéria discorre que, antes da pandemia, a prioridade das pessoas ao procurar um imóvel era a proximidade do local de trabalho ou de estudo. Devido ao isolamento social, a prioridade passou a ser imóveis que apresentam maior conforto e qualidade ambiental.

Foi observado por Salgado *et al* (2020) que o trabalho remoto, proporcionado pela pandemia, acelerou a implementação das Tecnologias da Informação para a Construção (TICs) no processo de projeto pelas empresas do setor da construção civil.

As novas tecnologias digitais estabelecem novas práticas de organização social, novas realidades culturais e novos meios de produção. Tecnologias surgem como opção para resolver problemas, sanar possíveis limitações e suprir necessidades.

Salgado *et al* (2020) salientam que embora as aplicações das TICs no setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) sejam abundantes, a falta de capacitação de grande parte do setor produtivo nacional é ainda um grande impeditivo na inserção dessas tecnologias.

Nos grandes escritórios internacionais, as TICs já foram amplamente difundidas e já fazem parte do processo de projeto, como observado nos estudos de *design* computacional da Smartgeometry (PETERS; PETERS, 2013), grupo formado em

2001 por Hugh Whitehead, Lars Hesselgren, e J Parrish¹, e que objetiva a retomada das ferramentas paramétricas e do *design* computacional como método de desenvolvimento de projetos arquitetônicos.

Uma das temáticas abordadas pelo grupo é a simulação computadorizada. É descrito por Peters e Peters (2013) que o grupo foi fundado sob o argumento que a exploração dos princípios geométricos com base nas intenções do projeto pode beneficiar o partido e o projeto arquitetônico.

Por meio da geometria diferencial e com auxílio de programas de modelagem paramétrica, os arquitetos do grupo desenvolveram uma série de projetos que utilizaram a simulação do desempenho como método no processo exploratório de design.

Atualmente, o desempenho é uma das exigências mais comuns durante a produção de projetos na construção civil. O baixo nível de desempenho, seja estrutural, lumínico energético ou ambiental, pode se tornar um impeditivo para a construção do projeto.

Sob o ponto de vista do usuário, o nível de desempenho afeta diretamente o bem-estar, a saúde e o equilíbrio termofisiológico do corpo humano (MACKEY, 2015; MONTEIRO, BITTENCOURT, 2015; DUARTE, 2015; PENTEADO *et al*, 2020; DOS SANTOS, PORTO, SILVA, 2020). Pode ainda aumentar ou diminuir o estresse psicológico dos usuários, além de afetar o comportamento e o sistema imunológico e, no caso de edifícios comerciais, afetar também a produtividade dos funcionários (ORTIZ, KURVES, BLUYSSSEN, 2017; CASTALDO *et al*, 2018).

A preocupação com o nível de desempenho é ressaltada por uma série de pesquisas recentes que abordam o benefício das TICs no processo de projeto como método de avaliação do nível de desempenho dos projetos.

A partir de entrevistas realizadas com pesquisadores e profissionais, a pesquisa de Zardo, Mussi e Silva (2020) analisa o impacto das TICs: BIM, modelagem paramétrica e fabricação digital no processo de projeto e discorrem sobre as principais potencialidades e desafios para os meios acadêmico e profissional. As potencialidades foram categorizadas pelos autores em: custo, produtividade,

¹ No momento da sua fundação, os três arquitetos eram líderes de três grandes empresas de arquitetura: Foster + Partners, Kohn Pedersen Fox (KPF) e ArupSport, respectivamente. (WHITEHEAD; HESSELGREN; PARRISH, 2013).

colaboração, complexidade, racionalização e economia. Os desafios foram divididos entre: cultural, gerenciamento de dados e softwares.

Os resultados obtidos pela pesquisa apontam que grandes transformações tecnológicas demandam soluções convergentes e integradas. Os autores enfatizam que a academia e o meio profissional devem unir esforços, de modo a propor mudanças substanciais nas atuais práticas de ensino com o objetivo de superar os atuais entraves que dificultam a implementação das TICs no processo de projeto em empresas de AECO.

Leitner, Scheer e Santos (2019) realizaram uma revisão bibliográfica sobre a relação entre a tecnologia BIM e o desempenho das edificações. Os autores analisaram 79 artigos nas bases *Science Direct* e *Scopus*, publicados entre 2006 e 2017, e notaram que o assunto ficou mais popular a partir de 2014. Os autores identificaram quatro temáticas nos artigos selecionados: a integração da tecnologia BIM em conjunto com ferramentas de desempenho; a interoperabilidade entre as ferramentas BIM e os softwares de simulação do desempenho; a integração da tecnologia BIM com dados de sensores, como o escaneamento a laser e a fotogrametria e a integração do BIM com sistemas de classificação de construção sustentável, como o LEED e o BREAM.

Os autores identificaram que a interoperabilidade entre a tecnologia BIM e ferramentas de simulação é o assunto com o maior número de publicações e discorrem que:

Diante das várias ferramentas de simulação disponíveis não foi possível identificar a predominante, mesmo entre simulações de desempenho com a mesma finalidade. Isso pode justificar as dificuldades de interoperabilidade encontradas nas pesquisas, foco do segundo grupo identificado. Por outro lado, a ferramenta BIM mais utilizada nos artigos levantados é a Autodesk Revit, independentemente do objetivo da pesquisa (LEITNER, SCHEER e SANTOS, 2019, p. 28)

Também foi verificado pelos autores que os artigos selecionados não esclarecem como a interoperabilidade entre os softwares foi conduzida: *“Apesar de ser discutido sobre a interoperabilidade entre as ferramentas, carecem ainda de estudos que definam como essa interoperabilidade pode ser feita, como um manual, por exemplo”* p.28.

Esta monografia irá preencher parte dessa lacuna; serão expostos os métodos adotados para a implementação da simulação computadorizada em uma empresa de projetos de arquitetura e serão apresentados os procedimentos realizados para facilitar a integração do Archicad.

Silva *et al* (2019) propõem o desenvolvimento de uma ferramenta para verificar o nível de desempenho de projetos de AECO fundamentada nos requisitos da NBR 15575. Os autores desenvolveram um *plug-in* para o software Revit com o auxílio do Dynamo, uma ferramenta baseada em VPL (*Visual Programming Language* ou Linguagem de Programação Visual, em português) e da extensão DynoBrowser, para a criação da *interface* do *plug-in*.

Para os autores, este método promoveu a interoperabilidade entre a tecnologia BIM e a ferramenta de simulação, já que a análise foi feita por meio de um *plug-in* que é operacionalizado dentro da *interface* do Revit e não em um software à parte. Por fim, os autores concluem:

De modo geral, estas considerações significam que, o projetista com capacidade de programar seus próprios recursos pode desenvolver habilidades compatíveis com as suas novas responsabilidades na era digital e o coloca ao centro dos processos de informação. Assim, pode não somente automatizar tarefas, mas também integrar informações para aprimorar ou até mesmo criar novos processos durante o projeto, utilizando efetivamente o potencial de controle do BIM para integrar, compartilhar e monitorar o atendimento de regras em uma edificação. **Desta forma, programar as próprias ferramentas, embora ainda seja uma prática pouco difundida, pode se tornar uma competência de grande importância para o futuro da profissão, quando se considera que os processos de projeto contam com cada vez mais requisitos e particularidades que dificilmente são atendidos por grandes desenvolvedores (SILVA *et al*, 2019, p. 62, negrito nosso).**

Hoje em dia é possível projetar, simular e produzir arquitetura por meio de *scripts* e algoritmos de computador, viabilizando a criação de métodos cada vez mais flexíveis de produção e permitindo que arquitetos e projetistas personalizem suas próprias ferramentas computacionais, de forma a atender suas necessidades.

Esta monografia, embora não desenvolva um *plug-in*, utiliza uma ferramenta baseada em VPL, o Grasshopper, para a criação de um algoritmo com o objetivo de analisar o desempenho lumínico de projetos habitacionais. O algoritmo desenvolvido deve favorecer a execução das análises de desempenho lumínico, a adequação das

simulações à fase de desenvolvimento do projeto e, conseqüentemente, a implementação no processo de projeto da empresa.

Como será discutido em uma seção posterior desta pesquisa, a programação visual facilita o entendimento sobre conceitos da programação por projetistas com pouco conhecimento sobre computação.

Brown, Muller (2019) exaltam o grande potencial das ferramentas de modelagem paramétrica no processo de concepção edifícios. Citam que estes recursos estão sendo progressivamente aplicados como método de investigação e análise do desempenho das construções e como abordagem viável ao projeto orientado ao desempenho.

Os mesmos autores ressaltam que, embora estas ferramentas estejam se tornando cada vez mais populares, a implementação das simulações visando o desempenho no processo de projeto de empresas de arquitetura demanda cuidados. Os autores alertam que a definição dos parâmetros de análise deve ser feita por especialistas, de modo a garantir a qualidade dos dados e a veracidade da simulação.

Esta pesquisa reconhece que a execução de simulações demanda cuidados e concorda que a definição dos parâmetros de simulação deve ser feita por pessoas capacitadas.

A fixação de parâmetros irreais pode afetar o resultado da análise e comprometer a qualidade do projeto. Desta forma, para a implementação proposta, esta pesquisa propõe o assessoramento das equipes de desenvolvimento do projeto por um grupo de especialistas em simulações visando o desempenho.

Nesta pesquisa, o auxílio será realizado por uma equipe interna à empresa, formada por colaboradores com conhecimentos em desempenho, sustentabilidade e programação.

A pesquisa realizada por De Paula, Arditi, Melhado (2017) cita que o atendimento aos requisitos de sustentabilidade na construção civil demanda a inserção de diversas soluções de cunho técnico e tecnológico no processo de projeto. Porém, os autores afirmam que os quesitos de sustentabilidade modificaram a natureza do projeto, da construção e da operação de edifícios, de modo que as soluções de sustentabilidade devem abranger conceitos relacionados à coordenação e à gestão de projetos.

Os autores concluem que o sucesso da empresa depende de fatores relacionados ao planejamento estratégico, marketing, estrutura organizacional, gestão empresarial, gestão financeira e gestão de pessoas.

Essa visão é ampliada em De Paula, Melhado (2018, p.8, tradução nossa):

A sustentabilidade exige automaticamente processos de gestão no trabalho diário da empresa de design, uma vez que a sustentabilidade requer o seguinte: investimento (tanto financeiro, quanto no esforço de trabalho); aumento do conhecimento técnico; e atividades e agentes que são diferentes daqueles normalmente necessários. Conforme demonstrado pelos estudos de caso, as empresas de design têm se desenvolvido no sentido de ministrar cursos e treinamentos, adquirir software, disseminar conhecimento, realizar reuniões e trabalhar mais horas, criar checklists, interagir com consultoria de sustentabilidade e realizar novas atividades como planejamento com novas instalações, estudos ambientais, pesquisa de materiais mais detalhada, pesquisa de soluções de design mais detalhadas, definição de objetivos de sustentabilidade e documentação de certificação.

Cotta, Andery (2018) propõem a implementação de uma série de instrumentos no processo de projeto de quatro empresas do setor da construção com o intuito de auxiliar o atendimento à Norma de Desempenho NBR 15575. Os autores propõem um modelo de processo de projeto fundamentado na integração entre disciplinas de arquitetura e engenharia e suas respectivas equipes de projeto e obra. Sugerem mudanças nos procedimentos para contratação e na coordenação de projetos.

De fato, qualquer mudança no processo de projeto deve ser analisada sob a ótica da gestão de projetos. A implementação proposta por esta pesquisa está associada ao planejamento estratégico desenvolvido pela empresa de arquitetura para o quinquênio entre 2015 e 2020 e que demandou investimentos em gestão organizacional, tecnologia e treinamento de pessoas.

Esta pesquisa compreende que a inserção da modelagem paramétrica como método para simular o desempenho lumínico satisfaz a atual demanda da empresa de arquitetura de otimizar o desempenho de seus projetos. Ressalta-se que esta é a primeira iniciativa de uma série de resoluções que serão incorporadas ao longo dos próximos anos com o objetivo de aprimorar a qualidade ambiental dos projetos da empresa.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é a proposição de um método para a implementação da simulação visando o desempenho lumínico no processo de projeto de uma empresa de projetos arquitetônicos.

Os objetivos secundários são: i) O entendimento das técnicas de simulação por meio da modelagem paramétrica; ii) A compreensão da interoperabilidade entre as ferramentas digitais utilizadas por esta pesquisa: Archicad, Rhinoceros, Grasshopper, Ladybug e Radiance e iii) A assimilação sobre os requisitos de iluminação natural, estipulados pela Norma de Desempenho (ABNT, 2013).

1.3 ESTUDO DE CASO

A implementação da simulação visando o desempenho lumínico por meio da modelagem paramétrica será aplicada em uma empresa de projetos arquitetônicos fundada na década de 1971 e com sede na cidade de São Paulo.

A empresa, ao longo de cinco décadas de atuação, conseguiu sobreviver a diferentes crises econômicas que o país sofreu durante esse período. É possível afirmar que essa conquista é fruto de uma cultura que preza a inovação e a criatividade.

Ao longo do tempo a empresa desenvolveu projetos de agências bancárias, sedes corporativas, edifícios comerciais e residenciais, centros de lazer e cultura. Atualmente, grande parte de seus clientes são construtoras e incorporadoras focadas na realização de empreendimentos para o mercado imobiliário.

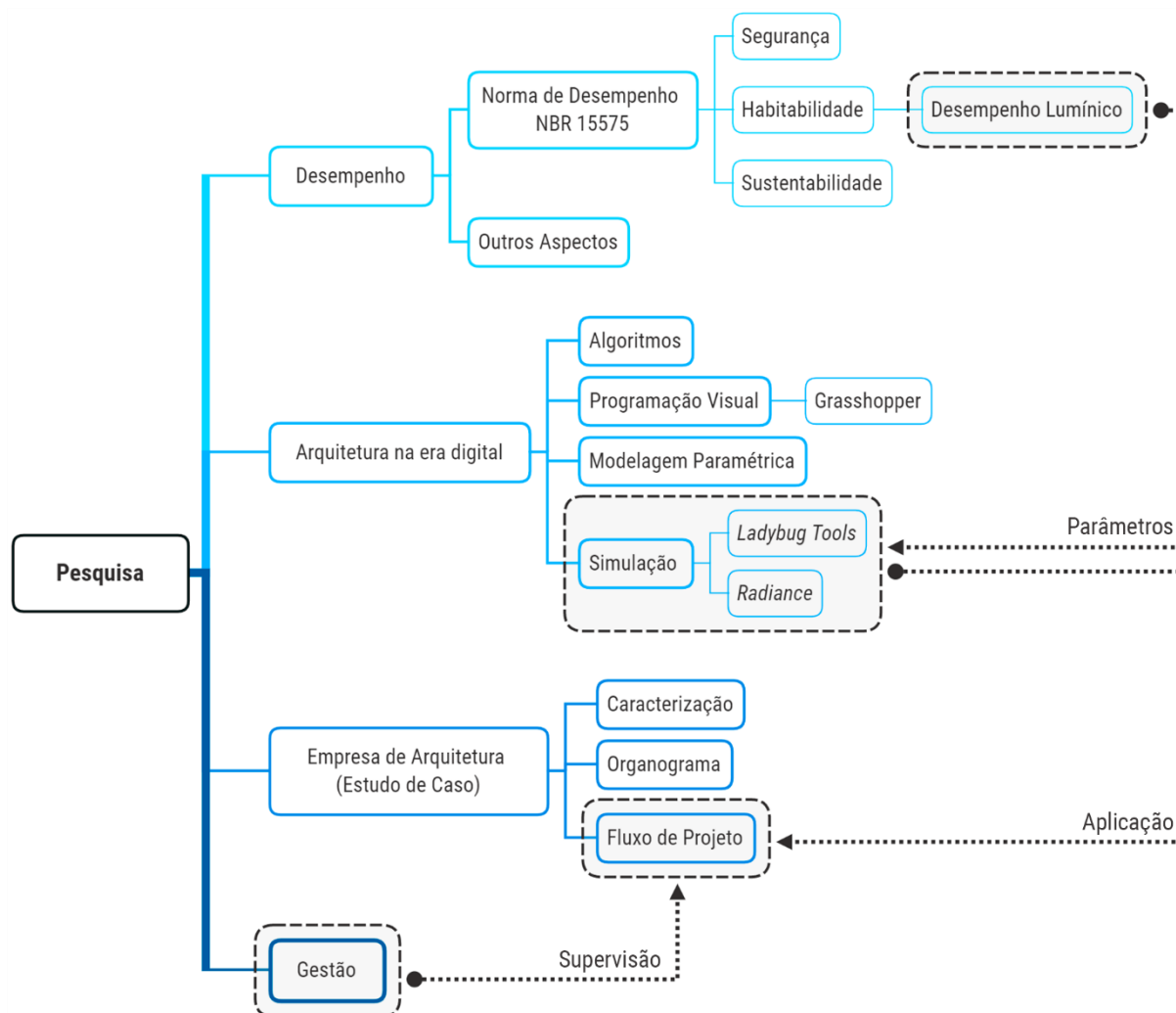
A escolha da empresa analisada por essa pesquisa foi motivada pela sua grande relevância no setor de projetos de arquitetura, pela participação do autor no processo de implementação, ao fácil acesso que o autor teve para reunir informações relevantes e pela proximidade com os demais colaboradores da empresa e com a alta gerência.

A análise mais aprofundada do histórico, do organograma e da caracterização da empresa será discutida por esta pesquisa no Capítulo 3.

1.4 MAPA MENTAL DA PESQUISA

Esta pesquisa foi estruturada a partir de quatro eixos norteadores: Desempenho; Arquitetura na era digital; Empresa de arquitetura (estudo de caso) e Gestão, como demonstrado pela Figura 1.

Figura 1 – Mapa Mental da Pesquisa



Fonte: Autor (2021).

O eixo “*Desempenho*” faz alusão ao conjunto de características que determinam a eficiência e o comportamento de uma edificação. Atualmente, o principal instrumento para aferir o nível de desempenho de uma construção é a NBR 15575, Norma Brasileira de Desempenho de Edificações Residenciais (ABNT, 2013), que expõe os requisitos de desempenho e os métodos de avaliação para projetos habitacionais.

Esta pesquisa irá explorar os requisitos e os parâmetros relativos ao desempenho lumínico da Norma de Desempenho, bem como outros aspectos e abordagens não normativas presentes em outras pesquisas nacionais e internacionais. Ressalta-se, porém, que somente as diretrizes definidas pela norma brasileira serão utilizadas como parâmetros de simulação, já que todos os projetos da empresa se situam no Brasil.

O eixo “*Arquitetura na era Digital*” propõe a reflexão sobre as transformações que as novas tecnologias digitais provocaram no modo de pensar e projetar arquitetura. Serão discutidos: o uso da programação na arquitetura; conceitos relacionados à programação visual, modelagem paramétrica e simulação e serão apresentados os *softwares* e ferramentas digitais que foram utilizados durante o desenvolvimento desta pesquisa: Rhinoceros, Grasshopper, Ladybug Tools e Radiance.

O eixo “*Empresa de Arquitetura (Estudo de Caso)*” reflete sobre a caracterização, a organização e o processo de projeto da empresa analisada por esta pesquisa. Por fim, o eixo “*Gestão*” faz menção aos métodos planejamento, controle e supervisão da qualidade dos processos desenvolvidos por esta pesquisa.

Os conceitos elencados por esses quatro eixos norteadores foram utilizados como base teórica e metodológica durante o desenvolvimento desta monografia. Eles auxiliaram a pesquisa do referencial bibliográfico e a concepção do método de implementação.

1.5 MÉTODO DE IMPLEMENTAÇÃO - TPPG

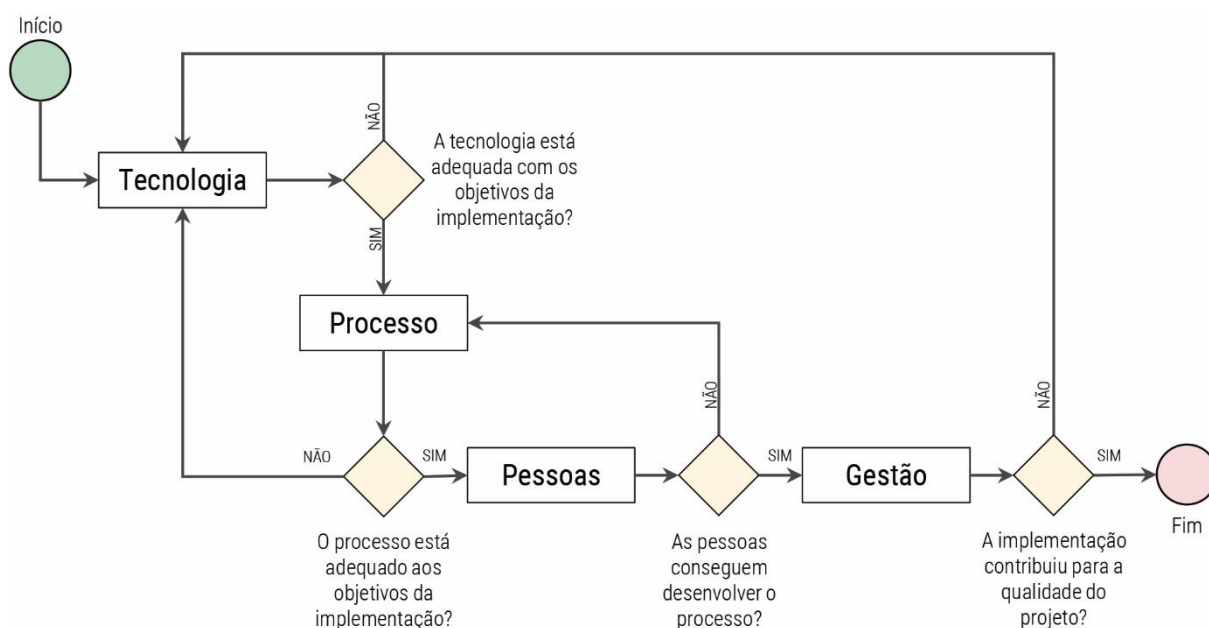
O método de implementação adotado por esta pesquisa foi dividido entre: Tecnologia, Processo, Pessoas e Gestão (TPPG). Estas quatro áreas podem ser observadas no mapa de implementação proposto por esta monografia, exibido pela Figura 2.

O método desenvolvido possibilita a análise dos objetivos da implementação sob a perspectiva dessas quatro áreas, permite a retroalimentação do processo, proporciona o desenvolvimento de uma rotina sistêmica de avaliação e possibilita a identificação de falhas e a proposição de ajustes.

Esta pesquisa entende que essas quatro áreas são correlatas e que as suas implantações demandam empenho e dedicação equivalentes. É compreendido que a

efetivação deste método depende da eficaz implantação das quatro categorias, de modo que cada área deve contribuir para a execução da etapa posterior. Em vista disso, cada categoria é sucedida por uma etapa de decisão (*gateway*) que verifica se aquela fase está de acordo com os objetivos da implementação.

Figura 2 – Método de implementação proposto



Fonte: Autor (2021).

Devido ao seu caráter de interdependência, o método proposto incentiva o diagnóstico sistemático de cada fase e defende que as adversidades na implantação de uma categoria são provenientes de incompatibilidades na fase antecedente.

É impreterível que as áreas de tecnologia, processo e pessoas sejam analisadas individualmente e que os objetivos de cada etapa sejam alcançados para que, posteriormente, a implantação seja analisada sob a perspectiva da gestão.

1.5.1 Tecnologia

A tecnologia é a primeira categoria analisada pelo método proposto. Esta etapa é marcada pela escolha das ferramentas digitais que serão implantadas no processo de projeto da empresa. Essa seleção deve ser fundamentada pelos objetivos da implementação proposta e deve considerar a complexidade da nova tecnologia, o

custo das novas ferramentas e as habilidades da equipe de implantação e dos demais colaboradores da empresa.

Na implementação proposta por esta pesquisa, a escolha dos softwares e plug-ins implantados (Grasshopper, Ladybug Tools e Radiance) foi balizada pelo conhecimento prévio da equipe de implementação nestas tecnologias, pela interoperabilidade com softwares já implantados na empresa e pela facilidade de adaptação desta ferramenta aos objetivos da empresa e à etapa de desenvolvimento do projeto.

Nessa categoria, os procedimentos metodológicos adotados são: O estudo do processo de simulação por meio da modelagem paramétrica aplicada a projetos residenciais, a análise da interoperabilidade entre os diferentes softwares e ferramentas computacionais utilizadas pela empresa e o desenvolvimento do algoritmo de simulação.

1.5.2 Processo

Após a avaliação da tecnologia empregada, o processo de implementação deve ser desenvolvido. Esse estágio objetiva a criação das etapas necessárias para operacionalizar e integrar a tecnologia ao processo de projeto da empresa. Devem ser esclarecidas as etapas que as equipes de projeto deverão executar para atender os objetivos da implementação e elucidadas as trocas de modelos e dados entre as tecnologias implantadas e os demais softwares utilizados pela empresa.

Para essa etapa do método de implementação, esta pesquisa adotou como procedimento o desenho do fluxograma para a execução das simulações de desempenho lumínico em que são apresentadas: as etapas do processo, as trocas de dados entre softwares e arquivos e os responsáveis pela operacionalização de cada etapa.

1.5.3 Pessoas

O processo desenvolvido deve facilitar a operacionalização da tecnologia pelas pessoas da empresa. Suas etapas precisam ser estruturadas de acordo com os

conhecimentos e habilidades dos colaboradores da empresa, de modo a facilitar sua compreensão e a execução.

Para facilitar o entendimento do processo de implementação pelas pessoas, esta pesquisa desenvolveu dois documentos de apoio: o “*Manual para execução de análises de iluminação natural conforme a NBR 15575*”, que explica, detalhadamente, as etapas do processo de execução das análises e o “*Guia de iluminação: Conceitos e estratégias projetuais*”, que explica alguns conceitos sobre iluminação natural e desempenho.

Além dos documentos de apoio, esta pesquisa adotou como procedimentos: a apresentação do processo de implementação aos colaboradores da empresa e a realização de treinamentos e assessorias com os arquitetos que irão operacionalizar o algoritmo.

1.5.4 Gestão

A adequação da tecnologia e do processo aos objetivos de implementação e a correta operacionalização das etapas do processo pelas pessoas podem acentuar a qualidade do projeto. A análise sob a ótica da gestão permite a reflexão sobre os resultados alcançados. Caso o processo desenvolvido não promova ganhos na qualidade final do projeto, é necessária a reavaliação de todo o método de implementação.

Essa análise pode ser realizada sob a ótica da gestão de projetos (*Design Management*) ou da gestão de empreendimentos (*Project Management*). Nesta pesquisa, essas análises são realizadas pela equipe de implementação, que verifica a qualidade das simulações produzidas pelos colaboradores da equipe de projeto e pelos Gerentes de Projeto que analisam a qualidade ambiental dos espaços, verificam se a implementação aumentou a percepção de valor dos *stakeholders* e se produziu vantagem competitiva.

Como o autor desta pesquisa integra a equipe de implementação e não faz parte da alta gerência da empresa de arquitetura, foi requisitado aos Gerentes de Projeto um relato contendo as suas visões sobre os resultados alcançados pela implementação proposta.

1.6 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

A pesquisa foi estruturada em seis capítulos:

Capítulo 1 – Introdução: introduz o tema proposto por esta pesquisa, os objetivos, o estudo de caso, apresenta os quatro eixos norteadores desta monografia e discorre sobre os métodos de implementação e pesquisa adotados.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: propõe uma revisão dos conceitos relacionados à programação visual, algoritmos, modelagem paramétrica e simulação digital e desempenho lumínico natural.

Capítulo 3 – Estudo de Caso: exhibe um breve histórico sobre a trajetória projetual da empresa de arquitetura, discorre sobre o processo de gestão de mudanças e adoção da tecnologia BIM e explana sobre a estrutura organizacional da empresa e o atual processo de projeto.

Capítulo 4 – Implementação: apresenta os processos adotados durante a implementação da simulação de desempenho lumínico no processo de projeto da empresa de arquitetura. Neste capítulo, o algoritmo desenvolvido é apresentado e suas etapas de desenvolvimento são explicadas; o processo de implementação é explicitado; os documentos de apoio à implementação produzidos por esta pesquisa são explanados e os métodos de gestão empregados na avaliação do processo de implementação são esclarecidos.

Capítulo 5 – Discussão: analisa as estratégias e o método utilizado e discute sobre resultados alcançados.

Capítulo 6 – Considerações Finais

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DESEMPENHO

O verbete “desempenho” pode adquirir significados diferentes dependendo do contexto da frase ou área do conhecimento. De acordo com Houaiss (2004), entre as definições da palavra “desempenho”² há o significado de atuação e comportamento.

É descrito por Hensel (2013) que comportamento e meio de inserção são dois conceitos indissociáveis. O autor incorpora ideias de diversas áreas do conhecimento, como física e biologia, para explicitar que indivíduos, organismos, objetos e produtos são diretamente influenciados pelo meio onde estão inseridos.

Na área da física, o autor cita os estudos de Isaac Newton que usava a palavra ‘meio’ (*Medium*) para descrever a influência da força gravitacional sobre os corpos. Cita também os estudos de Auguste Comte que estendeu o uso do termo ‘meio’ (*Milieu*) para definir não só o meio físico que rodeia um organismo, mas também as condições necessárias para sustentar a sua existência. Nos dois exemplos, é o meio que afeta o comportamento do objeto.

No caso de projetos de edificações, a relação entre o meio de inserção e a construção é bidirecional, ou seja, um afeta o comportamento do outro. Hensel (2013) declara que as atividades humanas acabam influenciando o meio de inserção da arquitetura tanto quanto os fatores geológicos.

Já é sabido como o meio é capaz de agir sobre as diferentes edificações e influenciar negativamente os seus usuários. Se um projeto não é bem pensado, o contexto urbano em conjuntura com aspectos geoclimáticos pode interferir na sensação de conforto e na qualidade de vida de seus habitantes.

Do mesmo modo, um edifício mal planejado pode, potencialmente, afetar as condicionantes de seu entorno próximo. Construções muito volumosas podem obstruir

² **Desempenho** s.m.

¹ execução (de tarefa etc.)

² atuação, comportamento

³ TEAT interpretação (d. da atriz)

(HOUAISS, 2004, p. 229)

os ventos predominantes, motivando a criação de ilhas de calor que alteram o comportamento (desempenho) das construções vizinhas.

Edifícios com fachadas muito espelhadas refletem uma grande quantidade de radiação solar e podem influenciar negativamente na sensação de conforto térmico das pessoas próximas à construção.

Preocupar-se com desempenho é preocupar-se com o comportamento dos diferentes sistemas que compõem uma edificação e o impacto dessas sobre a qualidade de vida de seus usuários.

O nível de desempenho de uma edificação tem influência direta no conceito de habitar. O habitar é uma ideia que extrapola as características físicas da edificação e reflete as *“características subjetivas inerentes à relação que se estabelece entre o(s) morador(es) e o ambiente sociofísico que o(s) recebe”* (ELALI, PINHEIRO, 2013, p.15).

Elali, Pinheiro (2013) salientam que uma construção não é definida apenas pelas suas propriedades físicas. Existem outras características do campo da psicologia ambiental que influenciam, diretamente, a qualidade vida de seus habitantes.

Para os autores, o nível de desempenho da edificação tem impacto direto na qualidade de vida de seus usuários e pode afetar a experiência ambiental de seus moradores, comprometendo a relação moradia-morador.

É da responsabilidade do arquiteto e urbanista projetar visando o desempenho e a sustentabilidade, como observado nos princípios do Código de Ética e Disciplina do Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil (CAU/BR):

O arquiteto e urbanista deve defender o interesse público e respeitar o teor das leis que regem o exercício profissional, **considerando as consequências de suas atividades segundo os princípios de sustentabilidade socioambiental e contribuindo para a boa qualidade das cidades, das edificações e sua inserção harmoniosa na circunvizinhança**, e do ordenamento territorial, em respeito às paisagens naturais, rurais e urbanas (CAU/BR, 2015, p. 7 – grifo nosso).

Arquitetos devem analisar o impacto de seus projetos sobre o contexto urbano e sobre as construções vizinhas, e da mesma maneira devem se preocupar com o conforto e qualidade de vida dos usuários de suas edificações. Todo impacto negativo no

desempenho da edificação deve ser analisado, mensurado e, sempre que possível, mitigado.

A busca pelo desempenho em edificações habitacionais abrange diversos itens, legislações e metodologias não normativas. As próximas seções deste capítulo discorrem sobre essas questões.

2.1.1 NBR 15575

Projetos de arquitetura e construção têm se tornado cada vez mais complexos na contemporaneidade. Um bom projeto de arquitetura deve apresentar diversas soluções integradas para itens relativos à sustentabilidade, construtibilidade, plasticidade e legislação.

Dos itens elencados, é possível afirmar que o termo plasticidade é o mais próximo à profissão de arquitetos e urbanistas. A plástica arquitetônica é definida como “(...) *aquilo que faz comparecer na solução de qualquer problema arquitetônico para realizar-se obra de arte*” (CORONA; LEMOS, 1998, p. 378).

A plasticidade é indissociável de questões relativas a ritmo, harmonia, proporção, forma, geometria e unidade. Por sua vez, a construtibilidade é uma coleção de características que aferem ao projeto as condições adequadas para a sua construção. Um projeto bem coordenado, integrado e que apresenta um conjunto de soluções técnicas certamente possuirá um alto nível de construtibilidade.

A legislação é possivelmente o item que mais gera incertezas em projetistas do setor da construção civil. É possível afirmar que todos os elementos que constituem um projeto de construção possuem ao menos uma norma técnica pertinente. Da mesma maneira, existe uma série de legislações municipais, estaduais e federais que afetam diretamente o que é permitido ou não em um projeto.

Uma das normas às quais arquitetos e projetistas devem se atentar é a Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais (NBR 15575). Publicada em 2013 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2013), a norma objetiva o estabelecimento de um método de avaliação de tecnologias para os diversos sistemas que compõem o edifício com apoio em critérios e requisitos de desempenho e métodos de avaliação.

A norma de desempenho é um “conjunto de requisitos e critérios estabelecidos para uma edificação habitacional e seus sistemas, com bases em requisitos do usuário, independentemente da sua forma ou dos materiais constituintes” (CBIC, 2013, p. 30).

Os requisitos dos usuários são divididos em três categorias: segurança, habitabilidade e sustentabilidade. Para cada um desses itens existem requisitos mínimos de desempenho e métodos de verificação.

Os requisitos de desempenho são “condições que expressam qualitativamente os atributos que a edificação habitacional e seus sistemas devem possuir, a fim de que possam atender aos requisitos do usuário” (CBIC, 2013, p. 31).

Os requisitos de desempenho presentes no item segurança são: a segurança estrutural, a segurança contra o fogo e a segurança de uso e operação. Os pressupostos relativos à habitabilidade incluem: estanqueidade, desempenho térmico, acústico e lumínico, saúde e higiene, qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade e conforto tátil e antropodinâmico. A sustentabilidade elenca os requisitos de: durabilidade, manutenibilidade e impacto ambiental (ABNT, 2013).

A mesma norma divide as formas de verificação dos atendimentos aos requisitos gerais em três categorias: simulações e análises de projeto, ensaios laboratoriais e inspeções e ensaios de protótipos (inspeções em campo). A escolha por uma ou mais de uma forma de verificação varia de acordo com o requisito do usuário e a etapa do projeto.

2.1.1.1 Requisitos para o Desempenho Lumínico

Como demonstrado pelo Quadro 1, o desempenho lumínico natural é uma exigência da Norma de desempenho (ABNT, 2013) que faz parte do requisito habitabilidade. A forma de verificação do desempenho distingue-se em: cálculo de iluminâncias, para a fase de projeto, e medição de fator de luz diurna, para medições *in loco*.

É importante ressaltar que a NBR 15575 exige o atendimento desses requisitos somente em edificações habitacionais e apenas em alguns ambientes. Porém, essa norma pode ser utilizada como base e fundamentação durante o desenvolvimento de projetos não-habitacionais que dispõem de ambientes de longa permanência, como hotéis e *flats*.

Quadro 1 – Requisitos e formas de verificação do desempenho lumínico natural.

Requisitos		Critério	Métodos de avaliação		
Usuário	Desempenho		Projeto	Laboratório	In loco
Habitabilidade	Desempenho lumínico	Níveis mínimos de iluminação natural	Cálculo de iluminância natural	—	Medição do Fator de Luz Diurna (FLD)

Fonte: ABNT (2013). Adaptado pelo Autor (2021).

A iluminância natural é calculada em *lux*. De acordo com a “NBR 5461 – Iluminação”, *lux* é uma unidade derivada do Sistema Internacional de Unidades que corresponde à: “iluminância de uma superfície plana de um metro quadrado de área, sobre a qual incide perpendicularmente um fluxo luminoso de um lúmen, uniformemente distribuído” (ABNT, 1991, p. 13).

A ABNT (2013) divide os níveis de iluminação natural em três níveis: mínimo, intermediário e superior, como observado na Tabela 1. Exige-se que todas as salas de estar, dormitórios, copas, cozinhas e áreas de serviço atinjam o nível mínimo de iluminamento natural; porém, é recomendado por essa norma que esses ambientes alcancem níveis mais elevados de desempenho, ampliando o conforto dos usuários.

Tabela 1 – Níveis de iluminamento de acordo com a Norma de Desempenho

Dependência	Iluminamento geral para os níveis de desempenho lux		
	<i>M*</i>	<i>I</i>	<i>S</i>
Sala de estar; Dormitório; Copa / cozinha; Área de serviço.	≥ 60	≥ 90	≥ 120
Banheiro; Corredor ou escada interna à unidade; Corredor de uso comum (prédios); Escadaria de uso comum (prédios); Garagens/estacionamentos	Não exigido	≥ 30	≥ 45

* Valores mínimos obrigatórios, conforme 13.2.1.

NOTA 1: Para os edifícios multipiso, admitem-se para as dependências situadas no pavimento térreo ou em pavimentos abaixo da cota da rua níveis de iluminância ligeiramente inferiores aos valores especificados na tabela acima (diferença máxima de 20% em qualquer dependência).

NOTA 2: Os critérios desta Tabela não se aplicam às áreas confinadas ou que não tenham iluminação natural.

NOTA 3: Deve-se verificar e atender as condições mínimas exigidas pela legislação local.

Fonte: ABNT (2013, p. 53).

2.1.1.2 Método para Avaliação do Desempenho Lumínico

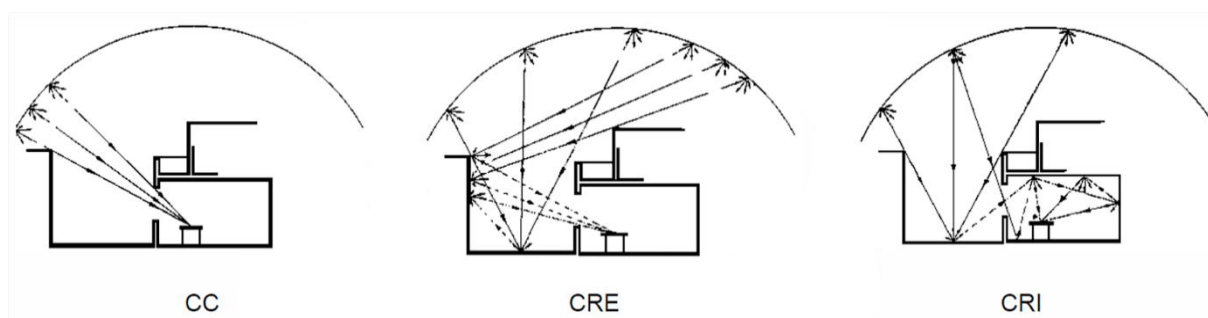
O item 13.2.2 da NBR 15575 indica os métodos de avaliação para as simulações de desempenho lumínico. A norma cita as condições de céu que devem ser utilizadas, as datas e os horários de simulação e as condições para a medição dos resultados.

A norma exige a aferição do desempenho lumínico em dois períodos: às 9h30min do dia 23 de abril e às 15h30min de 23 de outubro. Nos dois períodos devem ser consideradas a latitude e longitude do projeto, assim como a orientação em relação ao norte geográfico.

Para a configuração das condições de luz natural e da abóboda celeste, a Norma de Desempenho cita apenas que o cálculo deve supor nebulosidade média, com índice de nuvens de 50%. Não há referência aos tipos de radiação ou fluxos luminosos que devem ser empregados nas análises.

Porém, a mesma norma faz referência a “*NBR 15215-3 – Iluminação natural Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos.*” (ABNT, 2005). Entre os diversos procedimentos que essa norma estabelece, encontra-se o procedimento de cálculo do fluxo luminoso que deve ser usado em simulações lumínicas.

Figura 3 – Fontes de luz natural que alcançam o edifício



Fonte: ABNT (2005, p. 4).

A ABNT (2005) divide o fluxo luminoso em três categorias, como observado na Figura 3: i) o componente céu (CC), que é a luz que alcança o interior do ambiente e que é proveniente da abóboda celeste; ii) a componente refletida externa (CRE), que são os feixes de luz que alcançam o interior do ambiente interno após serem refletidos por uma superfície externa e iii) a componente refletida interna (CRI), que é a luz que

alcança o ponto de medição após ter sofrido reflexões em superfícies internas do ambiente.

A norma ressalta que a somatória desses três fluxos luminosos, corrigidos por fatores relativos à manutenção e à transmissão lumínica, resulta na Contribuição de Iluminação Natural (CIN), como definido por ABNT (2005, p. 4):

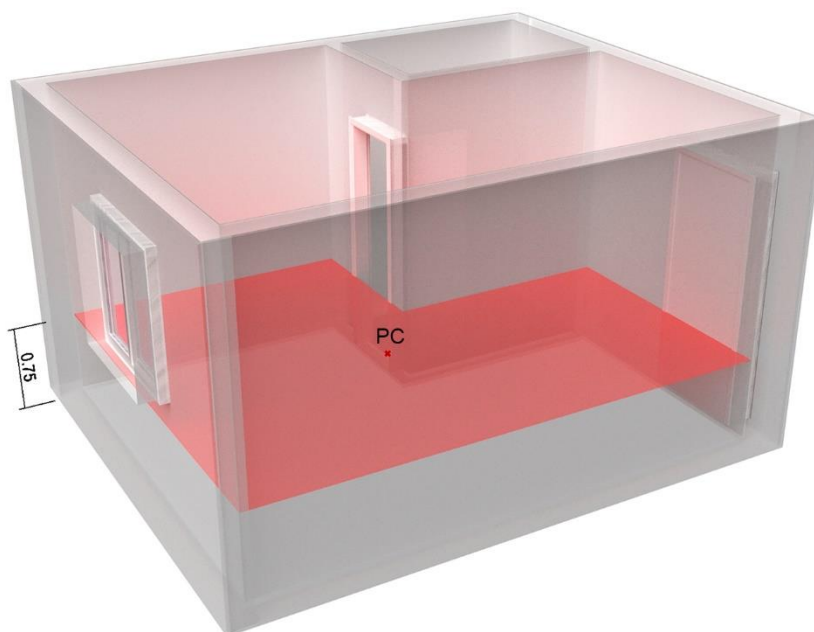
A soma destes três componentes, corrigida por fatores relativos aos diversos efeitos redutores, onde FM representa um fator de manutenção das superfícies internas, K_T é a transmissividade do vidro, K_M é o fator de manutenção dos vidros e K_C é o fator de caixilho (ver valores no anexo B), representa o nível de iluminação natural num ponto do ambiente interno, conforme expressão

$$CIN = [CC + CRE + (FM * CRI)] * K_T * K_M * K_C$$

Nota-se que a radiação direta, aquela que é proveniente do sol e produz sombras, não é referenciada pela ABNT (2005). Consequentemente, para o cálculo da CIN, esse tipo de radiação não deve ser utilizado.

A medição do nível de iluminância natural, de acordo com a NBR 15575, é feita por meio do cálculo da quantidade de lux no ponto central (PC) de um ambiente a uma altura de 0,75 m do piso acabado, como exibido pela Figura 4.

Figura 4 – Plano de análise e ponto central em um ambiente típico



Na Figura 4, nota-se em vermelho o plano horizontal para a análise a 0,75 m do piso acabado. Observa-se também a marcação do ponto central do ambiente onde será calculado o nível de iluminância do ambiente.

A NBR 15575 cita também que todos os eventuais sombreamentos como construções vizinhas, muros e taludes devem ser considerados durante a execução das análises de iluminância, pois, como cita a NBR 15215-3:

A magnitude e a distribuição da luz no ambiente interno dependem de um conjunto de variáveis, tais como: disponibilidade da luz natural (quantidade e distribuição variáveis com relação às condições atmosféricas locais), obstruções externas, tamanho, orientação, posição e detalhes de projeto das aberturas, características óticas dos envidraçados, tamanho e geometria do ambiente e das refletividades das superfícies internas (ABNT, 2005, p. v).

O método de cálculo pode variar de acordo com o software empregado e os parâmetros adotados. Os procedimentos e métricas utilizadas por esta pesquisa serão expostos em uma seção posterior.

2.1.2 Outras Abordagens

Existe uma série de abordagens não normativas que contribui para o desempenho das edificações, para o aumento da qualidade ambiental e para o aperfeiçoamento da relação entre o usuário e a edificação.

De modo mais abrangente, Zumthor (2006) cita que a qualidade arquitetônica está associada a diversos conceitos e características intrínsecas do espaço arquitetônico. São particularidades que comovem e emocionam os usuários e que são denominadas pelo autor de “Atmosfera”.

De acordo com Zumthor (2006) estes elementos são: i) a geometria do espaço; ii) a consonância dos materiais; iii) a acústica; iv) a temperatura; v) os elementos, objetos e mobiliários que rondam o espaço; vi) a “sedução espacial” que conduz usuário a vaguear e explorar o espaço; vii) a relação entre o espaço interno e o exterior; viii) a escala dos elementos que compõem o espaço e ix) a luminosidade natural.

Esses elementos se relacionam com conceitos pertinentes ao desempenho e qualidade ambiental, de modo que aprimoram a relação morador-moradia e a qualidade de vida de seus habitantes.

2.1.2.1 Sustentabilidade

O conceito de desempenho também está associado a questões relacionadas à sustentabilidade. Segundo Addis (2009), a preocupação com a sustentabilidade se consolidou a partir da década de 1960, quando diversos pesquisadores começaram a analisar o impacto dos processos de produção industrial e da agricultura na poluição atmosférica, na contaminação dos corpos d'água e no deterioramento dos ecossistemas mundiais.

Essa preocupação, segundo o autor, fortaleceu-se durante a década de 1980 com o desenvolvimento de políticas e legislações que visavam a reduzir o impacto do ser humano sobre o meio ambiente. Essas políticas influenciaram o modo como arquitetos pensam e produzem arquitetura. A partir da década de 1990, surgem as primeiras certificações para construções sustentáveis como o LEED, o HQE e o BREEAM.

Para o arquiteto Renzo Piano, projetar visando à sustentabilidade:

Significa respeitar a fauna e a flora, localizar corretamente edifícios e estruturas, explorar a luz e o vento e estabelecer uma relação inteligente com o meio-ambiente, que (como todas as relações inteligentes) implica também um certo grau de tensão entre o construído e a natureza (PIANO, 2016, p. 22, tradução nossa).

Para Raman (2005), sustentabilidade na construção civil significa minimizar o consumo de recursos, como água, energia e materiais, e progressivamente maximizar a saúde e qualidade de vida dos usuários das edificações.

Duarte (2005) discute sobre a importância do microclima urbano, que reúne os contextos urbano e climático. Para a autora, não é possível pensar em projetar um edifício sem considerar o contexto em que este estará inserido. O edifício e o ambiente urbano agem de forma correlata, um influenciando o outro.

A mesma autora cita que o grande fator gerador do desconforto ambiental em países tropicais é a radiação solar e discorre sobre as diversas estratégias projetuais que

visam a diminuir o impacto da radiação solar e que podem amenizar as influências do contexto urbano sobre o conforto térmico urbano, incluindo:

(...) manter os corredores de vento onde necessário para favorecer as trocas convectivas, aumentar o albedo as superfícies urbanas para reduzir o calor estocado, incluir a vegetação e o solo permeável em locais estratégicos para aumentar as perdas por evapotranspiração, minimizar a geração de calor antropogênico nos transportes, nas indústrias, nos sistemas de ar-condicionado etc. (DUARTE, 2005, p. 159).

2.1.2.2 Biomimética

A complexidade e a variedade de formas encontradas na natureza foram desenvolvidas após milhões de anos de evolução. Thompson (1961) escreve sobre os princípios matemáticos encontrados nas formas de carapaças de artrópodes, conchas de bivalves, entre outros, e afirma que toda forma orgânica encontrada na natureza é regida por princípios matemáticos e geométricos.

A arquitetura orgânica é considerada por Montaner (2005) como aquela que busca construir edificações com os mesmos preceitos de adaptação, desenvolvimento e crescimento das formas encontradas na natureza. Para o autor, a busca pela essência da forma como composição estrutural começou nas artes com as correntes abstratas, neoplasticistas e expressionistas.

Para Zevi (1950), a arquitetura é orgânica quando o arranjo espacial da edificação ou da cidade é planejada para o bem-estar humano, físico, psicológico e espiritual. O orgânico é baseado no social, não apenas na ideia formal da construção.

Braham (2005) cita que o termo “Biotécnica” (*Biotechnique*) foi cunhado em 1939 pelo arquiteto austro-húngaro Frederick Kiesler a partir de um artigo publicado na revista *Architectural Record* (KIESLER, 1939).

Nesse artigo, Kiesler explica que o termo ‘biotécnica’ reflete a sinergia e a inteiração entre o ser humano, o ambiente que o rodeia e a tecnologia. Braham (2005) afirma que a biotécnica surge a partir de três proposições: a tecnologia é resultante da constante evolução das necessidades humanas, os sistemas tecnológicos se desenvolvem de forma não linear e os critérios finais para o desenvolvimento de uma tecnologia não devem ser o desempenho técnico, mas a saúde humana.

Até agora, a arquitetura foi julgada a partir de quatro pontos de vista: (1) beleza, (2) durabilidade, (3) praticidade e (4) baixo custo. Mas esses quatro fatores nunca foram totalmente coincidentes em uma única obra. Se uma obra de arquitetura não é bonita, é perdoada com o fundamento de ser barato; se não barata, é perdoada por ser durável; se não for prática, é talvez linda. Parece, então, que a única maneira de resolver essas contradições antigas é encontrar um critério o que servirá para todas. *Este critério, na minha opinião, só pode ser a saúde.* O resto pode ser deixado para as idiossincrasias pessoais por parte dos consumidores e produtores, desde que estes não prejudiquem o critério essencial. Assim, a arquitetura, no futuro, não será julgada sobretudo por sua beleza de ritmo, justaposição de materiais, estilo contemporâneo, etc etc.; só poderá ser julgada pelo seu poder de manter e melhorar o bem-estar físico e mental do homem. *A arquitetura torna-se assim uma ferramenta para o controle da saúde do homem, sua degeneração e regeneração* (KIESLER, 1939, p. 65 e 66, tradução nossa, itálicos do autor).

A pesquisa de Gruber (2011) aprofunda o conceito de Biomimética e sua relação com a arquitetura. Para a autora, a biomimética em arquitetura não é baseada na mera cópia das formas da natureza, mas sim no *“uso de analogias funcionais, processos, mecanismos, estratégias ou informações derivadas de organismos vivos”* (GRUBER, 2011, p.127, tradução nossa).

Nome (2015) descreve que o entendimento de conceitos relacionados à biomimética auxilia o projetista a compreender o ambiente que rodeia a edificação em sua micro e macro escala. A autora cita que biomimética possui os princípios de: integrar o ambiente construído com a coerência dos ecossistemas que o rodeia; proporcionar o convívio harmônico do homem com os recursos naturais do planeta como luz natural e ar limpo; aumentar o desempenho geral dos diferentes sistemas das edificações, de modo que a forma final da edificação seja baseada no desempenho e não apenas na função, como no movimento moderno.

2.2 ARQUITETURA NA ERA DIGITAL

A arquitetura se coloca na intersecção entre arte e tecnologia. O lado artístico da arquitetura reflete a história da sociedade, a cultura, os anseios e as perspectivas de vida de uma comunidade. O lado técnico angaria questões relativas aos materiais, as técnicas de construção e a ciência.

A cada nova tecnologia, alternam-se a forma de se fazer, pensar e representar arquitetura. Piano (2011, p.19) cita que a *“arquitetura é o espelho muitas coisas”* e seu

caráter é constantemente alterado pelas distintas expressões artísticas, e pelas inovações técnicas.

Ao decorrer das épocas, arte e tecnologia se reinventaram e se transformaram diversas vezes; a arquitetura como ofício técnico-artístico acompanhou estas transformações.

A demanda por novas tecnologias surge a partir de crises sociais, políticas e econômicas, de acordo com Stalder (2018) a pressão ocasionada pelas crises somadas à experiência, motivaram diversos agentes, no século XX a alterar processos pré-estabelecidos e a propor mudanças em paradigmas tecnológicos.

De acordo com Stalder (2018) as tecnologias, consideradas hoje como inovadoras ou revolucionárias, foram introduzidas em pequenos nichos culturais e científicos, nas margens da sociedade e por muito tempo passaram despercebidos pelas grandes instituições e seus atores.

Para Carpo (2011), as tecnologias que versam com a sociedade, e que desenvolvem uma relação dialética com um grupo social acabam se perpetuando, e tendem a perpetuar transformações tecnossociais duradouras. Para o autor: *“Arquitetos gostam de estar à frente das tecnologias de seu tempo, e as invenções dos artistas costumam a comentar e interpretar as convenções tecnossociais futuras”* (CARPO, 2011, p.92, tradução nossa).

Essa temática é amplamente abordada em McLuhan (2007), onde o autor discorre sobre a relação bidirecional entre os avanços tecnológicos e sociedade. A sociedade cria novas tecnologias e novos métodos de produção, com o objetivo de sanar possíveis limitações e suprir necessidades. A tecnologia, por sua vez acaba mudando e moldando a sociedade. O autor cita que as tecnologias acabam se tornando extensões do próprio corpo-humano.

Ao longo dos anos, diversas TICs foram desenvolvidas e aperfeiçoadas, com a intenção de resolver adversidades relativas à complexidade das formas arquitetônicas contemporâneas, aos complexos programas de uso e ocupação, e a coordenação entre as diversas disciplinas da construção.

As próximas seções deste capítulo apresentam conceitos relacionados ao uso de algoritmos de programação visual em projetos arquitetônicos, a modelagem paramétrica e a simulação digital. Serão apresentados os softwares e *plug-ins*

utilizados por esta pesquisa: Rhinoceros, Grasshopper, LadybugTools e Radiance, e serão discutidas as influências destas tecnologias no processo de projeto na era digital.

2.2.1 Algoritmos

Um algoritmo é, sobretudo, uma poderosa ferramenta para resolver problemas. Pode ser definida como uma sucessão finita de etapas, desenvolvidas a partir de um procedimento computacional lógico e bem definido. É um processo que produz um resultado ou um conjunto de resultados, como saída (*output*); a partir de um valor, ou conjunto de valores de entrada (*input*) (CORMEN *et al*, 2009).

Cada etapa do algoritmo deve ser rigorosamente desenvolvida, de modo a remediar possíveis incertezas e ambiguidades. Para Knuth (1997) a eficácia de um algoritmo depende de quatro conceitos: a finitude de suas etapas, a exatidão do conjunto, seus valores de entrada e valores de saída.

Algoritmos são concebidos por meio de um sistema sequencial e lógico, a partir da associação entre parâmetros, condições, repetições, funções, classes e objetos. Terzidis (2006) expressa que o grande poder dos algoritmos está na sua capacidade de expansão do intelecto humano por meio da indução de novos conhecimentos e novos modos de pensar.

Para Scherer, Siddiq, Viveros (2019), o pensamento computacional é um conceito que envolve a resolução de problemas com base na teoria da computação. Para Shute, Sun, Asbell-Clarke (2019), esse tipo de pensamento envolve cinco processos cognitivos: reformulação de problemas, recursão, decomposição de problemas, abstração e a produção de testes sistemáticos.

Softwares livres são ferramentas computacionais que concedem o acesso do usuário ao código fonte do programa. Possibilitam a edição, personalização e a adaptação do código fonte às necessidades do usuário (MENEZES, 2016).

Alguns softwares de acesso restrito, permitem a inserção de algoritmos para facilitar processos e rotinas, como é o caso do Archicad, Revit e do Rhinoceros, que admitem o uso de *scripts* em Python e C#, junto a suas interfaces, como demonstrado pela dissertação de Sena (2019).

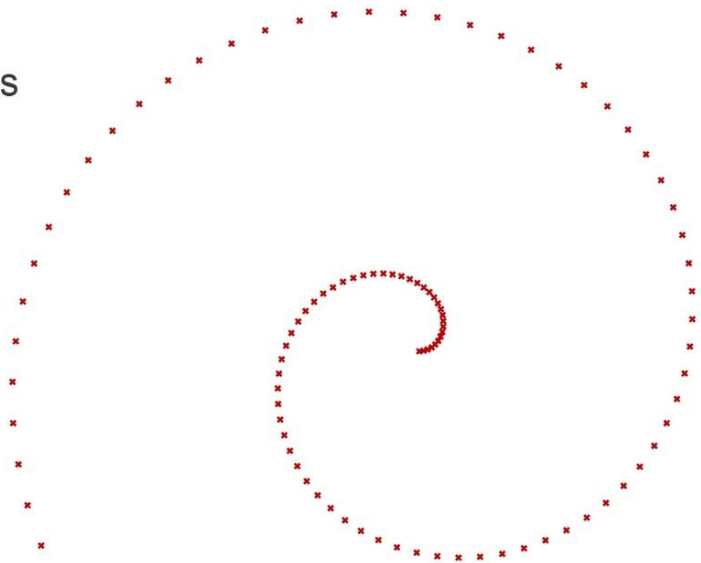
A Figura 5 exibe um algoritmo desenvolvido em Python, uma das linguagens mais populares e mais utilizadas na atualidade. O algoritmo apresentado utiliza duas funções matemáticas (cosseno e seno) para criar, respectivamente, o valor da abcissa (x) e da ordenada (y) para uma série de pontos. O resultado das funções $\cos(i * 0.1) * i$ e $\sin(i * 0.1) * i$ cria uma série de pontos no plano cartesiano, seguindo o padrão de uma espiral.

Figura 5 – Algoritmo em linguagem Python e forma resultante

```
import rhinoscriptsyntax as rs
import math
```

```
a = []
for i in range(x):
    x = math.cos(i*0.1) * i
    y = math.sin(i*0.1) * i

    p = rs.AddPoint(x , y)
    a.append(p)
```



Fonte: Autor (2021).

O algoritmo e seu resultado são inseparáveis, a alteração das linhas do *script* irá, inevitavelmente, alterar a forma resultante. Esta relação dialética permite ao usuário identificar as partes do algoritmo que geram determinadas partes do modelo, favorece o rastreamento e a alteração de funções e parâmetros.

O emprego da linguagem de programação, no processo de projeto em arquitetura proporciona a automatização de procedimentos repetitivos e rotineiros, permite que arquitetos e projetistas ocupem grande parte de seu tempo em atividades ligadas a experimentação, e proporciona uma série de novas possibilidades que ampliam a capacidade criativa dos arquitetos e projetistas. Como descrito em (BURRY, 2011, p. 9, tradução nossa): “*Como o script é efetivamente uma sobreposição de programa de computador, o usuário da ferramenta (designer) se torna o novo criador de ferramentas (engenheiro de software).*”

Um dos grandes obstáculos para a inserção dos algoritmos, nas empresas de arquitetura é o desconhecimento da lógica da programação, pelos arquitetos e projetistas envolvidos no processo de projeto.

Para Menezes (2016), programar demanda muito mais do que a memorização dos comandos, parâmetros e funções que compõe a sintaxe da linguagem de programação, que é facilmente esquecida. A programação visa, sobretudo, a solução de problemas; o programador, por meio da sintaxe computacional promove a solução para este problema.

2.2.2 Linguagens de Programação Visual

As linguagens de programação visual, também conhecidas pelo termo em inglês *Visual Programming Language* (VPL) são linguagens computacionais compostas por elementos ou entidades visuais, que podem ser selecionadas e incorporadas ao *script*.

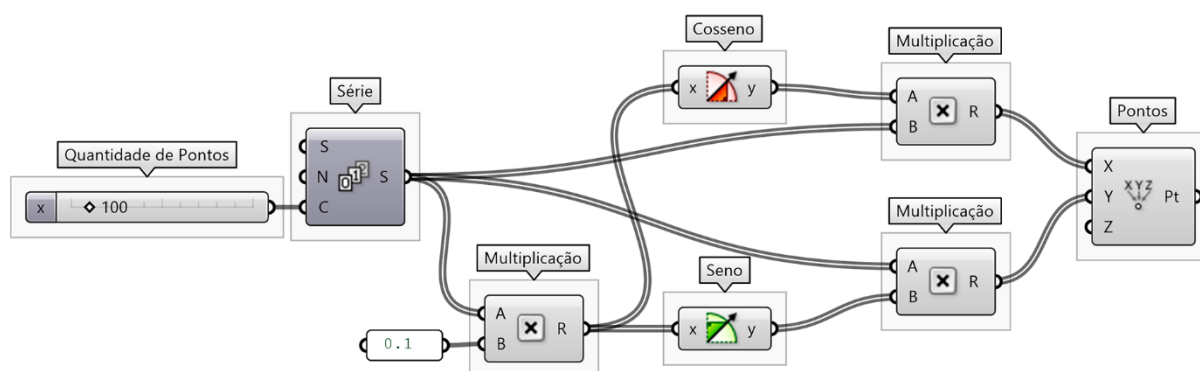
Estes elementos contêm embutidas, as funções, condições ou os parâmetros existentes em qualquer sintaxe de programação textual, porém são representados, na *interface* do software como representações visuais, geralmente em formato de blocos (TEDESCHI, 2014), a programação é feita por meio da conexão dos *inputs* e *outputs* dos diferentes elementos que compõem o algoritmo, por meio de “cabos”.

Algumas ferramentas de VPL utilizadas no setor da construção civil incluem: o Grasshopper, que é operacionalizado junto com o Rhinoceros (McNeel) o Dynamo, um *plug-in* para o Revit (Autodesk); o GenerativeComponents (Bentley) e o Param-O, do Archicad (Graphisoft).

No Grasshopper, as entidades visuais são divididas entre: i) parâmetros: entidades que armazenam geometrias ou variáveis numéricas; e ii) componentes: elementos que executam diferentes operações e ações, e convertem os dados de entrada, em dados de saída (TEDESCHI, 2014).

O algoritmo exposto pela Figura 6 foi feito com o auxílio do Grasshopper, uma das ferramentas de VPL mais utilizadas na atualidade. O resultado deste algoritmo é igual ao exibido pela Figura 5, uma série de pontos que seguem o padrão de uma espiral.

Figura 6 – Algoritmo desenvolvido no Grasshopper



Fonte: Autor (2021).

Neste algoritmo existem dois parâmetros, a quantidade de pontos (100) e um fator igual a 0.1, usado como um multiplicador. O restante da programação é formado por cinco tipos de componentes: i) um componente “Série”, que cria um conjunto de números a partir de um valor inicial (S), um valor de *step* (N), e a quantidade de elementos da série (C); ii) três componentes de multiplicação, que calcula o produto entre dois números; iii) uma função seno; iv) uma função cosseno e v) uma construção de ponto, que cria pontos a partir da definição de seus *inputs* de entrada, que representam as coordenadas x, y e z.

A pesquisa realizada por Hu, Chen, Su (2021) compara o processo de aprendizagem das ferramentas VPL, com o processo de aprendizagem de ferramentas de programação textuais, em um grupo de estudantes. O resultado apresentado pelos autores indica que os alunos que aprenderam com o auxílio de ferramentas VPL tiveram um desempenho acadêmico, significativamente, melhor do que aqueles que aprenderam programação por meio de ferramentas de programação baseadas em texto. Para os autores, as ferramentas de programação VPL são mais intuitivas e apresentam sintaxe mais simples, quando comparadas às ferramentas de programação tradicional.

A interface visual das ferramentas de VPL torna a programação computacional mais acessível aos usuários com pouco treinamento em sintaxe computacional, de modo que as linhas de código são representadas por ícones, facilmente, distinguíveis; todos os componentes e parâmetros estão disponíveis em uma barra de ferramentas que podem ser, facilmente, acessados pelo usuário (KIRSCHNER, 2015).

Embora o aspecto visual das ferramentas de VPL torne o processo de aprendizagem mais intuitivo, o seu uso demanda novas formas de se pensar e de produzir o projeto arquitetônico (OXMAN, 2008a).

Para Aish, Hanna (2017), o aprendizado destas ferramentas demanda a superação de uma série de “barreiras abstratas”, termos e conceitos que dificultam a progressão da curva de aprendizagem, e que devem ser superados para se alcançar a proficiência no uso da ferramenta. No caso do Grasshopper, listas, *data trees* e *branches*, são os conceitos que apresentam os maiores desafios, durante o processo de aprendizagem.

2.2.3 Modelagem Paramétrica

O conceito de modelagem paramétrica (MP) começa a surgir por volta da década de 1980. Monedero (2000) cita que nessa época, os conceitos de modelagem tridimensional e geométrica já haviam sido assimilados e havia um constante sentimento que as novas técnicas de modelagem digital deveriam avançar na direção da interatividade entre o computador e o projetista.

Em uma das primeiras pesquisas sobre o assunto, Kalay (1989) define a MP como a representação computacional das relações geométricas que constituem uma forma ou *design*. A alternância das relações geométricas, também definidas como “parâmetros” produz variações deste *design*.

Na MP, a modelagem acontece por meio da declaração dos parâmetros que compõem o desenho do objeto. É um processo que demanda a criação de um algoritmo que interpreta os dados provenientes dos parâmetros e, a partir de um conjunto de componentes, funções, restrições e regras, converte os dados numéricos em geometria tridimensional (WOODBURY, 2010; KOLAREVIC, 2003).

A parametrização não é restrita às ferramentas de MP, este conceito é amplamente utilizado em softwares que usam a tecnologia BIM (*Building Information Modeling*) e é aplicado durante o processo de edição de famílias ou elementos da construção.

Porém, na MP o projetista consegue associar os diversos parâmetros que compõem o projeto, e pode propor mudanças integrais à sua volumetria. Enquanto no BIM, a mudança de parâmetros é mais restrita, cada família possui seus próprios parâmetros, não é permitida a associação entre parâmetros de famílias diferentes: a variação dos

parâmetros de uma parede, por exemplo, não inflige nos parâmetros, na geometria ou no tipo das lajes, colunas ou vigas.

O processo de manipulação dos parâmetros com a MP é altamente dinâmico, e resulta em uma grande quantidade de alternativas de projeto, o mesmo processo, quando realizado por meio da tecnologia BIM é desconexo, e demanda o ajuste desassociado dos parâmetros das famílias.

A MP se diferencia dos demais tipos de modelagem digital, pois seu objetivo final não é a criação de um único resultado, mas uma família de formas; onde cada elemento possui relações de similaridade com os demais elementos do conjunto (AISH, WOODBURY, 2005; FLORIO, 2011; VEIGA, 2016).

Esta relação de similaridade é denominada por alguns autores de relação topológica. Kolaveric (2003) cita que a topologia é a análise das características geométricas, particulares à um conjunto de elementos ou objetos. Lynn (1998) cita que a topologia auxilia no estudo dos parâmetros e das propriedades geométricas mais interessantes de uma família de formas. JABI *et al* (2017) cita que a topologia é o estudo das propriedades geométricas dos elementos que não são afetadas pelas alternâncias de parâmetros. Os autores discorrem que esta propriedade facilita a etapa de definição da forma e aprimora o pensamento paramétrico.

A alternância dos parâmetros por meio da MP facilita o descobrimento de novas relações geométricas, para um mesmo objeto, viabiliza a experimentação de um grande número de opções e simplifica o processo de análise das diferentes alternativas, sob a ótica do desempenho ou plasticidade (BURRY, 2011; VEIGA, FLORIO, 2016).

O dinamismo da MP facilita a experimentação de diferentes alternativas de projeto e está diretamente relacionado com as atividades desenvolvidas durante o processo de projeto em arquitetura, como entendido por Veiga (2016, p. 91):

Projetar é um ato dinâmico, uma interação entre fazer, ver, refazer e descobrir. Nesse âmbito, procedimentos de representação computacional têm como papel auxiliar o arquiteto na busca da geometria que melhor se adeque ao terreno, ao partido e ao programa proposto. A utilização de diferentes métodos de representação estimula o processo de reinterpretação da forma.

Este método toma partido da alta taxa de processamento dos computadores na atualidade. Um algoritmo com poucas variáveis pode produzir e simular dezenas, ou até mesmo centenas de possibilidades, muito além do que um cérebro humano é capaz de lidar.

Para Schumacher (2008), uma alternância quantitativa, entre os diversos parâmetros que compõem a geometria do edifício produz mudanças qualitativas nos resultados. A MP é, sobretudo, um processo exploratório, que pode ser associada às ferramentas de desempenho e simulação, com o objetivo de encontrar a alternativa de projeto que atingirá o melhor nível de desempenho.

O designer não modela mais uma edificação; em vez disso, ele desenvolve um gráfico ou script cuja execução gera o modelo. Isso permite a criação de um tipo completamente diferente de arquitetura. O processo de design também muda. Uma edição aparentemente pequena no gráfico ou script pode ter um efeito profundo na construção gerada, permitindo a exploração de uma vasta gama de alternativas (AISH, 2013, p. 43, tradução nossa).

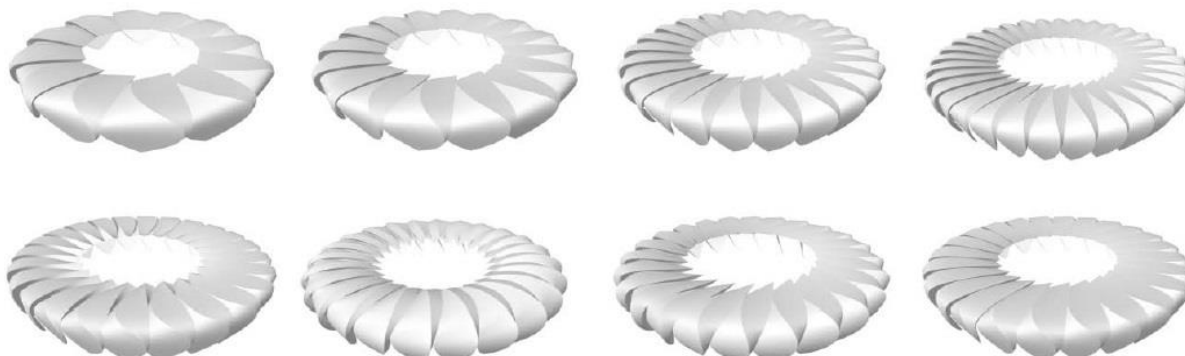
A aplicação da MP em um projeto é exposta em Miller (2011), onde o autor apresenta as etapas para a concepção da estrutura para a cobertura do Centro Olímpico de Tênis de Hangzhou, projeto do escritório americano NBBJ.

Segundo o autor, o design da cobertura do estádio é baseado em um sistema modular de treliças de aço, sua forma é resultante da criação de um algoritmo paramétrico que possibilitou conceituar, simular e documentar sua complexa geometria.

Neste projeto, a MP foi utilizada para definir e controlar a geometria das superfícies e estudar diversas alternativas e variações geométricas. Ferramentas de análise estrutural foram utilizadas para analisar o impacto da geometria no comportamento da estrutura.

A cobertura é composta por 24 módulos treliçados, em formato de pétala dispostos ao redor de uma circunferência. O uso da MP durante a concepção dos módulos possibilitou à exploração geométrica e a criação de diversas alternativas de projeto, como observado na Figura 7.

Figura 7 – Variações na forma da cobertura do Centro Olímpico de Hangzhou



Fonte: MILLER (2011, p. 144).

Miller (2011) cita que embora a variação dos parâmetros de projeto tenham sido, em grande parte baseada em princípios estéticos, o uso de parâmetros controladores de sombreamento, drenagem e desempenho estrutural, também foram utilizados, e ajudaram na escolha da geometria com maior nível de desempenho.

A análise da superfície dos módulos que compõem a cobertura foi feita por meio de um algoritmo que possibilitou a criação de superfícies regradas desdobráveis, fundindo estética e técnica, auxiliando na etapa de corte dos painéis de fechamento em alumínio e policarbonato e na construtibilidade do edifício.

A MP se tornou possível com o desenvolvimento de novas tecnologias e maneiras de representação. Softwares baseados na tecnologia NURBS, atrelados a plug-ins, que usam parâmetros numéricos para a concepção e estudo da forma, facilitam o estudo da geometria proposta. Com isso é possível investigar relações de escala, proporção, curvatura simples, curvatura dupla, simetria ou plasticidade, alterando os parâmetros que compõem a forma. Na modelagem paramétrica o estudo da geometria é realizado por meio de relações entre parâmetros que permitem variações geométricas. Consequentemente a alteração dos parâmetros gera um processo dinâmico que possibilita ao projetista investigar e propor novas relações espaciais (VEIGA, 2016, p. 79).

Wortmann e Tunçer (2017) analisaram a forma, a estrutura e a geometria de três edifícios que utilizaram a MP durante as etapas de criação: o *Future of Us Pavillion* (Advanced Architecture Laboratory), o *Louvre Abu Dhabi* (Jean Nouvel) e o *Morpheus Hotel* (Zaha Hadid). Nestes projetos, os autores concluem que a MP permitiu a criação de novas geometrias, e possibilitou o desenvolvimento de projetos singulares, onde a forma final do projeto integra aspectos de desempenho e plasticidade.

Os mesmos autores identificaram quatro vantagens atribuídas à MP: i) a flexibilidade, a capacidade de gerar diferentes variações, fundamentadas em aspectos ligados ao desempenho e à plástica; ii) a escalabilidade, a competência que os algoritmos possuem de lidar com grandes quantidades de dados e informações; iii) a verificação automática de regras e iv) o auxílio na integração entre disciplinas e na colaboração entre os diferentes agentes do projeto.

Por fim, os autores demonstram que o pensamento paramétrico (*Parametric Design Thinking*) vai além da geração e da representação de uma série de alternativas de design, e é crucial no desenvolvimento de projetos de geometria complexa. Os autores apontam que este pensamento está cada vez mais integrado, e é cada vez mais presente nas grandes empresas de arquitetura e engenharia, deste modo, é importante que mais arquitetos, engenheiros e consultores recebam o treinamento adequado em programação visual e modelagem paramétrica.

2.2.4 Simulação Digital

É importante salientar que a preocupação com o desempenho dos ambientes não é algo recente, as grandes civilizações antigas da Mesopotâmia, Egito e Pérsia empregavam soluções passivas de construção, como forma de amenizar as excessivas temperaturas, predominantes naquela região do planeta (ADDIS, 2009).

A grande diferença das construções antigas, para as contemporâneas está na complexidade dos sistemas construtivos e na quantidade de elementos contidos em uma edificação moderna. Esta complexidade trouxe novos desafios ao projeto de AECO, que demandam soluções integradas e convergentes, com o objetivo de aumentar o conforto ambiental e o desempenho do edifício.

Muitas vezes a quantidade de elementos presentes em uma edificação ultrapassa o limite de análise de um cérebro humano. O desenvolvimento de simulações digitais promove a verificação dos diversos sistemas construtivos, sob a ótica do desempenho e promove a detecção antecipada de possíveis problemas futuros, antes mesmo que estes aconteçam.

Hernandez (2015) cita que o desenvolvimento das primeiras ferramentas de análise e simulação foram iniciados na segunda metade do século XX, nas décadas de 1960 e

1970, com o objetivo inicial de examinar o desempenho energético das construções, posteriormente, este enfoque foi ampliado, e começaram a surgir as primeiras análises de climatização, iluminação e ventilação.

Neste mesmo século, diversas vertentes da arquitetura manifestavam a preocupação com a sustentabilidade e o desempenho dos edifícios. A pesquisa de Jencks (2000) expõe um panorama evolucionário da arquitetura moderna, e classifica suas diferentes linhas de pensamento, em seis tradições diferentes: lógica (*logical*), idealista (*idealist*), autoconsciente (*self-conscious*), intuitiva (*intuitive*), ativista (*activist*) e não consciente (*unselfconscious*).

A tradição lógica é descrita pelo autor como a vertente que inicia os desenvolvimentos oferecidos pela ciência e tecnologia e os aplica no modo de se projetar, construir e fabricar. É desta vertente que nasce a *Deutscher Werkbund*³ na década de 1910, o funcionalismo, na década de 1920, os CIAMs⁴ em 1940, a escola paramétrica, em 1960 e a “*Eco-Tech*”, vertente dos anos 1990, que assimila a alta tecnologia às questões de sustentabilidade.

Leatherbarrow (2013) discorre que as atuais ideias de desempenho muito se assemelham às questões levantadas pelo funcionalismo do começo do século XX. Contudo, o autor afirma que a grande mudança das ideias atuais, para o funcionalismo da década de 1910 é a técnica. Os atuais instrumentos de modelagem e medição produzem resultados mais claros e precisos.

Na contemporaneidade, com o advento de técnicas digitais é possível simular diferentes situações de uso, ocupação e desempenho, e caso seja necessário propor mudanças ou ajustes na forma dos edifícios. Indaga-se quais condições microclimáticas o usuário irá encontrar durante o uso-operação, e a partir desta análise são propostas as mudanças pertinentes (LEATHERBARROW, 2013).

³ Grupo originalmente formado por 12 artistas e designers alemães, ao longo da década de 1910 outros nomes ligados a arquitetura e design se associaram como, Hermann Muthesius, Theodor Fischer, Karl Schmidt, Peter Behrens, Josef Hoffmann e Wilhelm Kreis. “Os membros da *Werkbund* dedicaram-se ao aperfeiçoamento de um centro que fomentasse os objetivos de sua instituição” (FRAMPTON, 2003, p. 131).

⁴ Congresso Internacional da Arquitetura Moderna. Criado por Le Corbusier em 1928, os CIAMs foram responsáveis pela propagação dos ideais modernistas na arquitetura e no urbanismo. Ver: Le Corbusier (1993).

Entende-se por desempenho energético o comportamento do perfil de consumo de energia e seus sistemas (iluminação, climatização, elevadores) durante um período (dias, meses ou anos). No caso de uso para projetos, a ferramenta pode fornecer os dados para uma correta seleção do sistema de climatização a ser utilizado. Já para o uso em retrofit, as ferramentas de simulação podem auxiliar na avaliação de alternativas para redução de consumo de energia, fornecendo à equipe subsídios para uma escolha mais adequada dos sistemas a serem modificados (HERNANDEZ, 2015, p. 286).

O entendimento das condições climáticas do local onde o projeto será inserido, nos estágios iniciais, aumenta a possibilidade de tomar decisões de projeto ambientalmente responsivas. Nessa etapa inicial do projeto, os arquitetos avaliam suas decisões, não apenas na intuição, mas com base em dados climáticos e ambientais. A simulação visando o desempenho pode ser utilizada como estratégia projetual para atingir objetivos específicos, como a redução dos impactos ambientais do edifício, redução do consumo energético e otimização do conforto térmico-lumínico. Deste modo, a forma final do edifício não é, meramente, fruto de predileções estéticas, mas de uma série de avaliações de desempenho.

A arquitetura de tradição contemporânea procura atender demandas impostas pelo meio que a cerca através de uma gama de ferramentas e tecnologias. O desenvolvimento de recursos de simulação, experimentação, modelagem e *scripting*, produziram novas formas, geometrias, designs, versões, interações e personalizações no discurso arquitetônico (VEIGA, 2016, p. 94).

Para Florio (2005), a simulação é entendida como uma investigação, realizada por meio de um modelo digital. Para o autor, a simulação permite explorar diferentes possibilidades morfológicas, antecipar a visualização do objeto a ser fabricado ou construído e propicia experimentações que não poderiam ser realizadas com o objeto final.

A visualização de dados é um dos aspectos mais importantes do processo de simulação, pois facilita a compreensão e a verificação de uma vasta quantidade de dados, ampara os projetistas durante o desenvolvimento do projeto e auxilia no processo de escolha da forma final do edifício (PETERS, 2018).

Para Peters (2018) a simulação é dividida em quatro etapas: a criação do modelo analítico, a execução da simulação, a visualização dos resultados e a interpretação dos dados.

O mesmo autor discorre que o modelo analítico deve conter quatro propriedades: i) deve ser uma representação da construção; ii) deve permitir a análise de algum aspecto do objeto em estudo, como desempenho lumínico, térmico, acústico, etc.; iii) deve ser uma simplificação da realidade, onde somente os elementos mais relevantes devem ser modelados e iv) o resultado da análise deve representar uma aproximação do comportamento real dos sistemas construtivos e dos fenômenos naturais, tais como a luz natural, a radiação solar e a orientação dos ventos.

Como dito anteriormente, a MP pressupõe a definição de parâmetros fixos e variáveis, e objetiva a criação de uma família de formas, por meio da alternância de parâmetros.

A associação da MP com softwares de análise bioclimática auxilia o estudo e a avaliação das alternativas de projeto, sob a ótica do desempenho, facilita a escolha da melhor solução projetual e favorece a retroalimentação do processo de simulação e análise (OXMAN, 2008b; PETERS, 2013).

O Grasshopper, uma das ferramentas de MP mais utilizadas, permite a integração com uma série de ferramentas de simulação bioclimática, como o Ladybug Tools, um *plug-in*, composto por um conjunto de quatro ferramentas: i) o Ladybug, utilizado para analisar dados climáticos e para configurar a exibição dos resultados das análises de desempenho; ii) o Honeybee, que executa diferentes tipos de análises e oferece integração com diferentes softwares de simulação, como o Radiance, para análises de iluminação, o OpenStudio e o EnergyPlus, para avaliação energética, e o Therm, para avaliação de troca de calor; iii) o Butterfly, que permite a integração com o OpenFOAM, para a realização de análises de CFD (*Computational Fluid Dynamic*) e iv) o Dragonfly, usado para analisar fatores climáticos urbanos, como ilhas de calor (ROUDSARI, PAK, 2013; MACKAY, ROUDSARI, 2018).

Para Clarke (2001), um dos maiores desafios no uso de ferramentas de simulação está na relação entre a qualidade da análise e o tempo de processamento. O autor salienta que esta relação deve ser definida de acordo com o estágio do projeto, as fases iniciais do projeto demandam simulações mais rápidas, etapas mais avançadas requerem análises mais precisas, e por tanto mais demoradas. Esta configuração visa a economia de tempo, no começo do projeto e demasiados retrabalhos, nas etapas finais.

O mesmo autor desenvolve um método para o desenvolvimento de simulações de desempenho energético, a partir das seguintes etapas: i) a criação de um modelo digital, que represente a construção que será analisada e caracterize as diferentes zonas térmicas; ii) a calibração dos parâmetros de projeto, onde devem ser definidos: o comportamento energético dos diferentes sistemas da construção e o perfil de uso e ocupação do edifício; iii) a definição das condições de entorno que afetam o desempenho da construção, como localização do projeto, temperatura de bulbo seco, velocidade dos ventos e orientação predominante, etc.; iv) a realização da simulação; v) a análise dos resultados; vi) a identificação dos sistemas e zonas problemáticas, que demandam alterações de projeto, de modo a reduzir o impacto deste sistema no consumo energético da edificação; vii) a definição das alternativas de projeto que mitiguem os problemas de desempenho; viii) a avaliação das alternativas de projeto, por meio de uma nova simulação. Como será visto em uma seção posterior, este método serviu como base para o desenvolvimento das simulações de desempenho lumínico, por esta monografia.

É ressaltado por Hernandez (2015) que cada vez mais, as ferramentas de análise e simulação estão sendo integradas aos processos de projeto que utilizam a tecnologia BIM, de modo a incorporar aspectos relativos ao projeto integrado, e realidade virtual. O autor conclui: *“Com isso, busca-se reduzir o tempo de análise e avaliação de alternativas, com a colaboração dos diversos profissionais envolvidos no processo, trazendo o uso da simulação para o projeto de edificações eficientes”* (HERNANDEZ, 2015, p. 293).

Nguyen, Reiter e Rigo (2014) esclarecem que o termo “otimização”, no campo da matemática estatística remete ao método de encontrar a solução mais adequada para um problema, a partir de um conjunto de variáveis. Para os autores, o processo de otimização em projetos de edifícios é dividido entre pré-processamento, execução da otimização e pós-processamento.

Na fase de pré-processamento, devem ser definidos os objetivos e as restrições da otimização, as ferramentas digitais que serão utilizadas e a modelagem do modelo analítico (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014).

Na etapa de execução da otimização devem ser estabelecidos os mecanismos de controle da análise. A simulação deve ser executada até um certo limite, o

programador deve estabelecer parâmetros de desempenho, que quando atingidos, suspendem a execução da análise (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014).

Na fase de pós-processamento, o resultado deve ser interpretado por profissionais experientes e sempre que possível, devem ser confrontados com o resultado de análises semelhantes, de modo a garantir o alto nível de confiabilidade (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014).

Um exemplo de método de otimização, voltado à projetos de arquitetura é retratado em Bernal *et al* (2020), onde os autores exploram a concepção arquitetônica de três edificações, a partir do vínculo da entre a MP, ferramentas de análise estatística e *plug-ins* de simulação digital.

Em um destes estudos de caso, um edifício residencial, os autores definem, primeiramente, os parâmetros de projeto que podem influir no desempenho lumínico e energético da construção, tais como: a proporção entre as superfícies transparentes e opacas na fachada (*WWR, Window-to-Wall Ratio*), a largura dos beirais da fachada, o índice de absorvância dos materiais da fachada, o fator de condutividade térmica dos vidros e o ganho solar da edificação. Em seguida, são definidos os valores para cada parâmetro de projeto, que serão explorados no processo de otimização. Foram propostas de dois a cinco valores, para cada parâmetro, totalizando 360.000 alternativas possíveis de projeto, como observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Definição dos valores para cada parâmetros de projeto

Parameters	Options	Total
WWR N	30, 40, 50, 60,70	5
WWR W	30, 40, 50, 60,70	5
WWR S	30, 40, 50, 60,70	5
WWR E	30, 40, 50, 60,70	5
Shading Depth N (m)	1.524, 3.048	2
Shading Depth w (m)	1.524, 3.048	2
Shading Depth S (m)	1.524, 3.048	2
Shading Depth E (m)	1.524, 3.048	2
Wall U-Value	0.141, 0.189, 0.284	3
Chi-Value	0.1, 0.48	2
Glazing U-Value	0.85, 1.4	2
SHGC	0.3, 0.5, 0.7	3
	Full factorial design space	360,000

WWR: Window-to-Wall Ratio; SHGC: Solar Heat Gain Coefficient.

Fonte: BERNAL *et al* (2020, p. 431).

Para reduzir o grande número de alternativas de projeto, os autores utilizaram uma ferramenta de análise estatística chamada JMP, que analisa a probabilidade de duas combinações de parâmetros produzirem resultados de iluminância e eficiência energética muito parecidos, a partir do uso desta ferramenta, os autores reduziram para duzentos, o número de possíveis alternativas de projeto.

Estas duzentas combinações de parâmetros foram utilizadas para alimentar o modelo analítico produzido no Grasshopper e o *plug-in* Ladybug foi utilizado para simular o desempenho lumínico e energético para essas alternativas de projeto. Após a execução das análises, os autores utilizaram o Design Explorer⁵, uma ferramenta *online* que facilita a visualização dos resultados e a escolha da melhor alternativa de projeto, sob a ótica do desempenho.

⁵ O Design Explorer é uma ferramenta de código aberto, desenvolvida pelo CORE Studio, a célula de pesquisa e desenvolvimento do escritório Thornton Tomasetti, que facilita a visualização das alternativas de projeto e das interações entre os vários parâmetros do projeto. Esta ferramenta lê arquivos de dados .csv e imagens .png, exportados pelo usuário, a partir do Grasshopper, Dynamo ou Catia. Os dados de desempenho e os parâmetros de projeto são exibidos em uma série de barras verticais, por meio da manipulação destas barras, o usuário consegue selecionar as melhores alternativas de projeto, que satisfazem os requisitos mínimos de desempenho (THRONTON TOMASETTI, 2021).

3 ESTUDO DE CASO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A empresa de projetos analisada por esta pesquisa foi fundada na década de 1970 por dois sócios arquitetos, um graduado em 1971, pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e outro graduado em 1975, pela Universidade de São Paulo.

O primeiro sócio foi professor de projeto em duas faculdades de arquitetura na cidade de São Paulo, atuou como diretor do IAB – Instituto dos Arquitetos do Brasil, foi presidente da ASBEA – Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura e membro do Comitê da Construção Civil da FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo⁶.

O segundo sócio foi consultor da Fundação Bienal de São Paulo, também foi presidente da ASBEA, foi membro do conselho do Museu da Casa Brasileira, atuou como membro do colegiado da SEHAB – Secretaria de Habitação da Prefeitura da Cidade de São Paulo e da Comissão Técnica do Sindicato de Habitação (Secovi).

O atual CEO é engenheiro mecânico, formado em 2009 pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Trabalhou na indústria automotiva, na pesquisa e desenvolvimento de projetos de veículos e sistemas, por meio de processos de otimização computacional. Começou a trabalhar na empresa em 2013, ainda como Gestor de Mudanças Estratégicas. Assumiu a atual função de CEO em 2016 e foi responsável pelo plano estratégico que resultou na adoção da tecnologia BIM na empresa.

Atualmente, a empresa analisada é uma das líderes no desenvolvimento de projetos arquitetônicos no país. Ao longo de cinco décadas de atuação a empresa desenvolveu projetos de arquitetura com diferentes temáticas e programas. Em seu portfólio encontram-se projetos residenciais, comerciais, corporativos, comércios e serviços, centros de lazer, complexos culturais e complexos de uso misto.

⁶ As informações relativas à formação e atuação dos sócios foram coletadas em no arquivo digital Empresa de Arquitetura (2015), utilizado para a apresentação da trajetória da empresa.

3.1.1 Histórico

No começo da década de 1970, a produção de projetos da empresa era baseada sobretudo em casas unifamiliares, pequenos comércios e serviços. Na segunda metade dessa mesma década, a empresa começou a produzir diversas agências bancárias, espalhadas por diversas cidades do país⁷.

A longínqua localização desses projetos muitas vezes localizados em outros estados não permitia o acompanhamento da execução da obra por parte da equipe de projetistas.

Dessa maneira, era imprescindível que o projeto executivo contasse de fato com todo o detalhamento necessário para a execução dessas agências. É possível afirmar que essa necessidade desenvolveu uma cultura que preza pela excelência técnica e construtiva. Essa competência é percebida até os dias de hoje nos projetos produzidos pela empresa.

Na década de 1980, a empresa de arquitetura começou a projetar seus primeiros edifícios comerciais. Os clientes eram em grande parte bancos que visavam construir as suas sedes comerciais.

Devido à grave crise financeira que atingiu o país nessa década, grande parte dos bancos que faziam parte da lista de clientes da empresa decretou falência. Foi após a perda de um expressivo número de clientes que a organização começou a buscar novas oportunidades no mercado imobiliário.

A segunda metade da década de 1980 foi marcada por um expressivo aumento no número de projetos de edifícios comerciais, sobretudo na cidade de São Paulo. Sob uma grande influência da arquitetura pós-moderna, a empresa começa a propor novas composições e novas linguagens para seus projetos. Nota-se nesse período uma busca pela inovação projetual e a criação de um discurso arquitetônico cada vez mais ligado ao pós-modernismo.

A década de 1990 foi marcada pelos primeiros projetos de edifícios residenciais produzidos pela empresa. Nesta mesma época surgiram os primeiros projetos de

⁷ Este histórico foi desenvolvido com informações coletadas no arquivo digital Empresa de Arquitetura (2015), utilizado para a apresentação da trajetória da empresa.

edifícios de apartamentos tipo *flat* e de uso misto, que agregavam mais de um uso dentro do mesmo projeto.

A segunda metade da década de 1990 foi marcada pela produção de um dos projetos mais notáveis da empresa: trata-se de um conjunto de uso misto, localizado em uma quadra no bairro do Itaim-Bibi, em São Paulo. O projeto agrupa uma torre corporativa, uma torre comercial, um hotel, uma praça de alimentação e um conjunto de salas de cinemas.

O projeto arranja seus vários usos ao redor de uma grande praça aberta que é utilizada como área de convivência pelos frequentadores dos edifícios e pela população vizinha ao empreendimento.

Na década de 2000 a arquitetura produzida empresa já estava alinhada com os preceitos da linguagem contemporânea. A partir dessa época a empresa buscou o emprego de novos materiais e novas tecnologias em seus projetos

Na mesma década, a empresa projetou um ícone do *skyline* paulistano: um conjunto de duas torres comerciais, localizado no bairro da Vila Mariana. O que torna esse edifício icônico é a riqueza plástica de suas fachadas, caracterizadas pelo movimento dos terraços de suas unidades.

A aprovação do Plano Diretor Estratégico da cidade de São Paulo⁸ em 2014 contribuiu para que a década de 2010 fosse marcada por um expressivo aumento na produção de projetos de edifícios de usos mistos. Foram desenvolvidos projetos residenciais que incorporavam usos comerciais, como lojas, cafés e mercados e usos de serviços como *flats* e hotéis.

Em 2018 foi inaugurado um dos projetos mais importantes da empresa, uma unidade do SESC São Paulo em uma das mais importantes avenidas da cidade. O projeto transformou a antiga sede administrativa do SESC em uma de suas unidades. Atualmente é um dos projetos mais conhecidos da empresa de arquitetura devido à sua importante vocação social e localização privilegiada, tornando esse projeto um notável cartão postal da cidade.

⁸ O PDE, Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014 define incentivos para uma melhor inserção das novas construções no meio urbano. São incentivados o uso misto, fachadas ativas e espaços para fruição pública de modo a qualificar os espaços públicos em zonas de maior adensamento populacional. Ver: São Paulo (2014).

Atualmente, a empresa possui um quadro com mais de 100 colaboradores entre gerentes, arquitetos e estagiários. A empresa continua a desenvolver projetos residenciais e de uso misto, com grande foco no mercado imobiliário. Nota-se um expressivo aumento de projetos localizados na zona leste de São Paulo e em cidades do interior paulista.

3.1.2 Implementação da Gestão de Mudanças

Em dezembro de 2020, o CEO da empresa concedeu uma entrevista ao autor desta pesquisa⁹ com o objetivo de exemplificar o processo de gestão de mudanças, a implementação da tecnologia BIM, a estrutura organizacional e o sistema de gestão adotados pela empresa.

Em 2013, o então Gestor de Mudanças Estratégicas, atual CEO da empresa, desenvolveu junto com os sócios fundadores o planejamento estratégico para o período entre 2013 e 2020.

De acordo com o CEO da empresa, o plano estratégico:

Era a primeira fase de um processo mais longo de mudanças. Nesta primeira fase, o nosso grande foco era a relevância comercial. Este era o principal desafio do escritório, se manter viável, relevante, dentro de um contexto bastante competitivo. De um ponto de vista do “*organizational life cycle*”, do ciclo de vida das organizações, a empresa com 40 e poucos anos de atividade estava em uma fase com baixa taxa de inovação, não havia uma grande renovação do serviço ofertado. A gente precisava levar a empresa para uma etapa mais dinâmica do ciclo de vida das organizações, recuperar a dinâmica que era muito mais presente nos primeiros anos da empresa. Mudar isso começava com a gente ser relevante comercialmente, não existe empresa sem cliente. Não adianta a gente falar: “Vamos fazer projetos incríveis!”; se não tem cliente, não tem projeto. Então o grande objetivo do planejamento estratégico é ser a primeira escolha dos nossos clientes (CEO DA EMPRESA, 2020).

De acordo com o CEO da empresa, a mudança estratégica do serviço oferecido pela empresa foi fundamentada a partir de três atributos: *design*, *delivery* e qualidade do serviço.

⁹ CEO DA EMPRESA (2020)

O *design* engloba a qualidade do projeto de arquitetura, a estética, a inserção urbana do projeto; o *delivery* faz referência à qualidade do pacote de entregáveis oferecidos pela empresa: a consistência e a conformidade dos desenhos arquitetônicos, a composição das imagens renderizadas; a qualidade do serviço faz referência ao prazo de entrega do projeto, de modo que a empresa se compromete a entregar todos os seus entregáveis de forma consistente e no prazo determinado.

O primeiro ciclo de implementação da gestão de mudança, entre 2013 e 2014, foi dedicado à organização financeira-administrativa e à melhoria do sistema organizacional da empresa.

Nessa época foi desenvolvido o Sistema de Gestão da Qualidade Eletrônico (e-SGQ), seguindo as boas-práticas contidas das normas: NBR ISO 9001 – *Sistemas de Gestão da Qualidade - Requisitos*, NBR ISO 21500 – *Gerenciamento de Projetos* e NBR ISSO/IEC 27001 – *Tecnologia da informação – Técnicas de segurança – Sistemas de gestão da segurança da informação – Requisitos* (EMPRESA DE ARQUITETURA, 2021a).

O e-SGQ é disponibilizado a todos os colaboradores por meio da intranet da empresa. Esse sistema divide a cadeia de valor da organização em seis processos: gerar demanda, propor solução, formalizar demanda, entregar solução e contabilizar demanda.

O sistema apresenta para cada processo um fluxograma com a definição das etapas a serem seguidas, os responsáveis, os produtos que devem ser gerados e os indicadores de qualidade que devem ser seguidos.

Em 2015, a atual estrutura organizacional da empresa, que será apresentada em seção posterior por esta pesquisa, foi desenhada. Até 2016, grande parte do investimento da empresa foi realizada com consultorias externas e com softwares de produtividade, como o Google GSuite. Em 2017, a empresa começou a implementação de métodos ágeis no sistema de gerenciamento de projetos. Ainda nesse ano novas ferramentas de gerenciamento foram adicionadas, como o Asana, que utiliza a metodologia Kanban para gerenciar as tarefas do projeto, e o Toggl, utilizado para contabilizar as horas trabalhadas por cada arquiteto, em cada tarefa do projeto (CEO DA EMPRESA, 2020).

3.1.2.1 Tecnologia BIM

A implementação da tecnologia BIM nunca foi o principal objetivo da empresa durante o processo de gestão de mudanças. O BIM foi ponderado como uma das iniciativas que levariam a empresa ao resultado almejado e produziria os benefícios definidos pelo planejamento estratégico.

De acordo com o CEO da empresa, para se tornar a principal escolha de seus clientes, a empresa precisava:

Introduzir uma transformação radical da forma como projetávamos, tanto do ponto de vista do *design* integrado, quanto da capacidade de tomar decisões mais assertivas. A vontade era mudar o ciclo de vida dos nossos projetos para termos mais tempo durante as etapas de concepção e menos tempo durante as fases de produção dos entregáveis. No fim, queríamos projetos de maior qualidade, com menor custo, entregues no menor tempo e produzidos de um jeito menos complexo (CEO DA EMPRESA, 2020).

A implementação do BIM foi uma necessidade decorrente do plano estratégico, uma escolha que partiu de dentro da organização e não dá vontade de seus clientes. Isso fica claro quando o CEO afirma: *“A gente fechou no começo deste ano o primeiro contrato onde o BIM está no escopo; até então nenhum cliente havia pedido o desenvolvimento do projeto em BIM”* (CEO DA EMPRESA, 2020).

De acordo com o CEO da empresa, foram definidos três objetivos durante a implementação da tecnologia BIM: i) deveria ser a tecnologia padrão para todos os projetos desenvolvidos pela empresa, ii) deveria ser utilizada durante todo o ciclo de vida do projeto, das fases de concepção às fases de desenvolvimento, e iii) deveria estar totalmente implementada até dezembro de 2018.

Deste modo, em setembro de 2017, a empresa começa a desenvolver seu projeto-piloto, um edifício residencial localizado na cidade de Sorocaba, no interior paulista. Esse projeto contou com a participação inicial de três colaboradores que já possuíam conhecimentos em modelagem no software escolhido pela empresa, o Archicad, da empresa húngara Graphisoft.

Nesse mesmo período, a empresa contratou o atual BIM *Manager* do escritório que ficou encarregado de gerenciar a adoção do BIM como padrão do escritório, além de desenvolver processos e boas-práticas e os *templates* de desenvolvimento de projeto.

Durante o prosseguimento do projeto-piloto, a empresa investiu em treinamentos para os demais arquitetos do seu quadro de funcionários. Em fevereiro de 2018, a empresa contava com 35 funcionários treinados e certificados pela Graphisoft. (CEO DA EMPRESA, 2020).

A parceria com a Graphisoft foi essencial durante grande parte do processo de implementação da tecnologia BIM. Além de treinar os colaboradores da empresa, a fabricante auxiliou o BIM *Manager* durante o desenvolvimento dos padrões de modelagem e boas-práticas.

Outro marco da implementação da tecnologia BIM aconteceu em maio de 2018, quando a empresa desenvolve o primeiro estudo de volumetria em BIM e o primeiro projeto com 100% da documentação de projeto desenvolvida com o auxílio da mesma tecnologia (CEO DA EMPRESA, 2020).

O BIM foi considerado a tecnologia o padrão na empresa em dezembro de 2018, quando todos os novos projetos da empresa começaram a ser desenvolvidos por meio do Archicad.

Em fevereiro de 2019, a empresa concluiu o seu primeiro projeto totalmente desenvolvido por meio da tecnologia BIM, da concepção ao projeto de execução para a obra.

3.1.2.2 Desafios e Dificuldades

Para o CEO, o grande desafio do processo de mudanças são a comunicação e o alinhamento das percepções, expectativas e perspectivas dos colaboradores da empresa.

A percepção é como as pessoas entendem a mudança estratégica e seus objetivos. A expectativa é o que as pessoas gostariam que acontecesse durante o processo. A perspectiva é como as pessoas se enxergam na mudança e como as ambições de cada profissional estão alinhadas com o processo (CEO DA EMPRESA, 2020).

O gestor deve comunicar o futuro que deve ser perseguido pela empresa e pelas pessoas, criar um plano exequível e informar os resultados alcançados com a intenção de desenvolver o sentimento de progresso entre os colaboradores da empresa.

As pessoas são um elo importante dentro da cadeia de valor da empresa. A falta de comunicação entre gestores e colaboradores pode comprometer a percepção, a expectativa e as perspectivas dos funcionários da empresa e, conseqüentemente, afetar o sucesso das mudanças propostas.

3.1.2.3 Considerações Parciais

Embora o planejamento estratégico tenha sido desenhado em 2015, foi a partir de 2019 que a empresa começou a experimentar um forte crescimento. *“Estávamos perto de atingir os objetivos do plano estratégico e a integração dos processos desenvolvidos desde 2015. (...). É essa integração de processos que faz o negócio crescer para outros patamares”* (CEO DA EMPRESA, 2020).

A colheita dos resultados, um ano antes da pandemia de 2020, evidencia que o planejamento estratégico foi desenhado no tempo certo, pois mesmo com a situação pandêmica, a empresa continuou a crescer em 2020 e 2021.

O número de projetos em desenvolvimento pela empresa ultrapassou os 60, em 2020. O trabalho remoto possibilitou a contratação de colaboradores de diferentes regiões do país e do mundo. Em dezembro de 2019 a empresa contava com um quadro de 73 colaboradores; já em janeiro de 2021 esse número passou para 107 funcionários que trabalham remotamente de nove estados brasileiros (RS, SC, PR, SP, RJ, MG, GO, BA, CE).

O processo de gestão de mudanças apresentado demonstra que o planejamento estratégico demanda a análise do ambiente externo e das condições internas da empresa. O planejamento deve analisar o contexto em que a organização está inserida, como as necessidades dos clientes, os seus concorrentes e as tendências do mercado. A partir disso, deve examinar os serviços e os produtos que a empresa oferece, de modo a promover vantagem competitiva sobre seus concorrentes.

Caso a empresa não possua atualmente vantagem competitiva ou vislumbre possíveis ameaças de seus concorrentes ou mudanças de paradigma tecnológico, faz-se necessário o desenho de um novo serviço ou a incorporação de novos atributos nas atividades oferecidas pela empresa.

O objetivo chave da mudança estratégica é a produção de maior valor, de forma mais eficiente e consistente. Desse modo, toda mudança vislumbra a melhoria da cadeia de valor, isto é, os serviços oferecidos pela empresa que satisfazem as necessidades dos seus clientes.

O planejamento estratégico deve analisar a atual cadeia de valor da empresa e entender qual elo está defasado e qual demanda ajustes, como entendido em:

A cadeia de valor é tão boa quanto o elo mais fraco dela. Tem empresa que gera pouco *lead*, a capacidade dela de atrair novos clientes é baixa. Outras empresas não conseguem converter o *lead*: atraem o cliente em um primeiro momento, mas o cliente não fecha o projeto, porque a empresa não possui o padrão tecnológico que ele busca, por exemplo. Cada situação demanda uma atitude diferente (CEO DA EMPRESA, 2020).

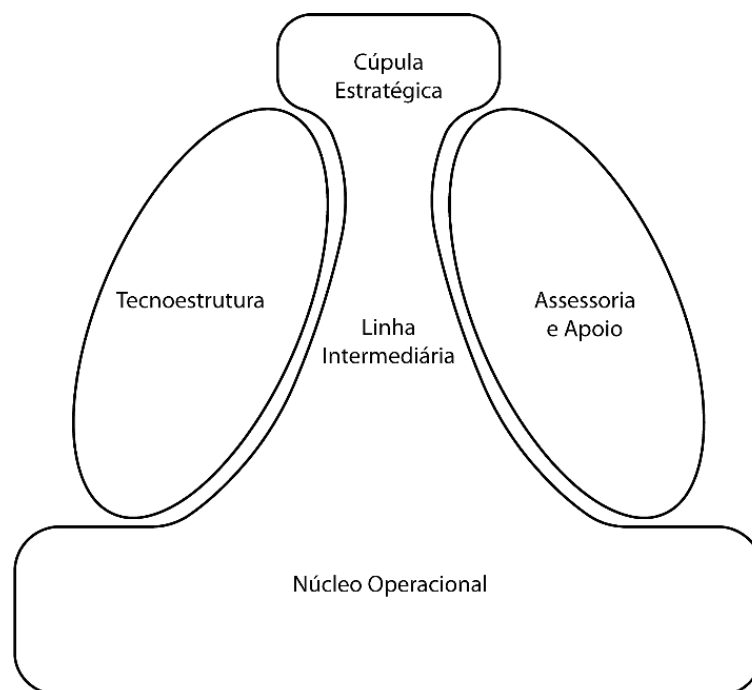
A implementação de novas tecnologias no processo de produção do serviço deve ser fundamentada pelos objetivos definidos no planejamento estratégico, pelo diagnóstico do ambiente externo e pela análise da cadeia de valor da empresa.

A tecnologia implementada deve considerar a atual situação da empresa e as competências e habilidades de seus funcionários, de modo que a tecnologia possa ser convertida em um processo exequível pelas pessoas. Ao mesmo tempo, deve vislumbrar o futuro e elevar a competitividade da empresa, de modo a mantê-la relevante.

3.2 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL – MODELO DE MINTZBERG

Durante a entrevista concedida, o CEO usou o modelo organizacional proposto por Mintzberg (2009) e exposto pela Figura 8, para exemplificar as diferentes funções organizacionais da empresa. Deste modo, esta pesquisa irá apresentar de forma sucinta esse modelo organizacional antes de exemplificar a estrutura organizacional da empresa analisada.

Figura 8 – Modelo organizacional proposto por Mintzberg (2009)



Fonte: Mintzberg (2009, p. 22).

Nesse modelo, Mintzberg (2009) divide a estrutura organizacional de uma empresa em cinco funções: i) Núcleo Operacional; ii) Linha Intermediária; iii) Cúpula Estratégica; iv) Assessoria e Apoio; e v) Tecnoestrutura.

No diagrama apresentado pela Figura 8, nota-se que o núcleo estratégico, a linha intermediária e o ápice estratégico aparecem conectados, enquanto a tecnoestrutura e o núcleo de suporte aparecem desanexados. Isso se deve às características e à influência de cada núcleo da organização.

Essas três partes da organização são mostradas em uma sequência ininterrupta para indicar que estão, tipicamente, conectadas por uma simples linha de autoridade formal. A tecnoestrutura e a assessoria de apoio são mostradas de ambos os lados de fora para indicar que estão separadas dessa linha de autoridade e influenciam o núcleo operacional apenas indiretamente (MINTZBERG, 2009, p.21).

De acordo com Mintzberg (2009), o núcleo operacional é formado por todos os colaboradores da empresa que atuam no desenvolvimento do serviço ou do produto da empresa. *“O núcleo organizacional é o coração de qualquer organização, a parte que produz os outputs essenciais que a mantêm viva”* (MINTZBERG, 2009, p.23).

A cúpula estratégica é formada pelas pessoas com maior responsabilidade na empresa, como gerentes executivos, diretores e o CEO. São esses os profissionais

que elaboram a visão estratégica organizacional, que asseguram o cumprimento da missão da empresa e controlam a satisfação de seus *stakeholders*.

A linha intermediária, ou média gerência, é formada por gerentes com acesso tanto ao núcleo estratégico quanto ao núcleo operacional e que atuam como ponto de conexão entre as duas áreas. O profissional que exerce esta função: *“coleta informações de feedback sobre o desempenho de sua unidade e transfere algumas delas aos gerentes acima, agregando-as frequentemente, ao processo. Também intervém no fluxo de decisões”* (MINTZBERG, 2009, p.26).

O núcleo de assessoria e apoio é formado por uma série de colaboradores e departamentos especializados que atuam indiretamente sobre o serviço ou produto oferecido pela empresa.

Os departamentos podem variar de acordo com o setor de atuação e o tamanho da empresa. De modo geral, esse núcleo é formado pelo departamento financeiro, departamento jurídico, pela equipe de manutenção, recepcionistas e secretárias da empresa.

A tecnoestrutura é composta por uma equipe de analistas¹⁰, fora da linha formal de execução do serviço, que atuam no desenho, planejamento e controle de qualidade dos processos executados pelo núcleo operacional. Mintzberg (2009) divide esses analistas três tipos:

(...) os analistas de sistemas e métodos (como os engenheiros industriais), que padronizam os processos de trabalho; os analistas de planejamento e controle (como os planejadores de longo prazo, os engenheiros de controle de qualidade, os programadores de produção e os contadores), que padronizam os *outputs*; e os analistas de pessoal (incluindo treinadores e recrutadores), que padronizam as habilidades (embora a maior parte dessa padronização ocorra fora da organização, antes de os trabalhadores serem contratados) (MINTZBERG, 2009, p.27).

São esses os colaboradores que podem propor mudanças nas etapas de trabalho do núcleo operacional com o intuito de adaptar o serviço ou produto desenvolvido pela empresa ao planejamento estratégico desenvolvido pela alta gerência.

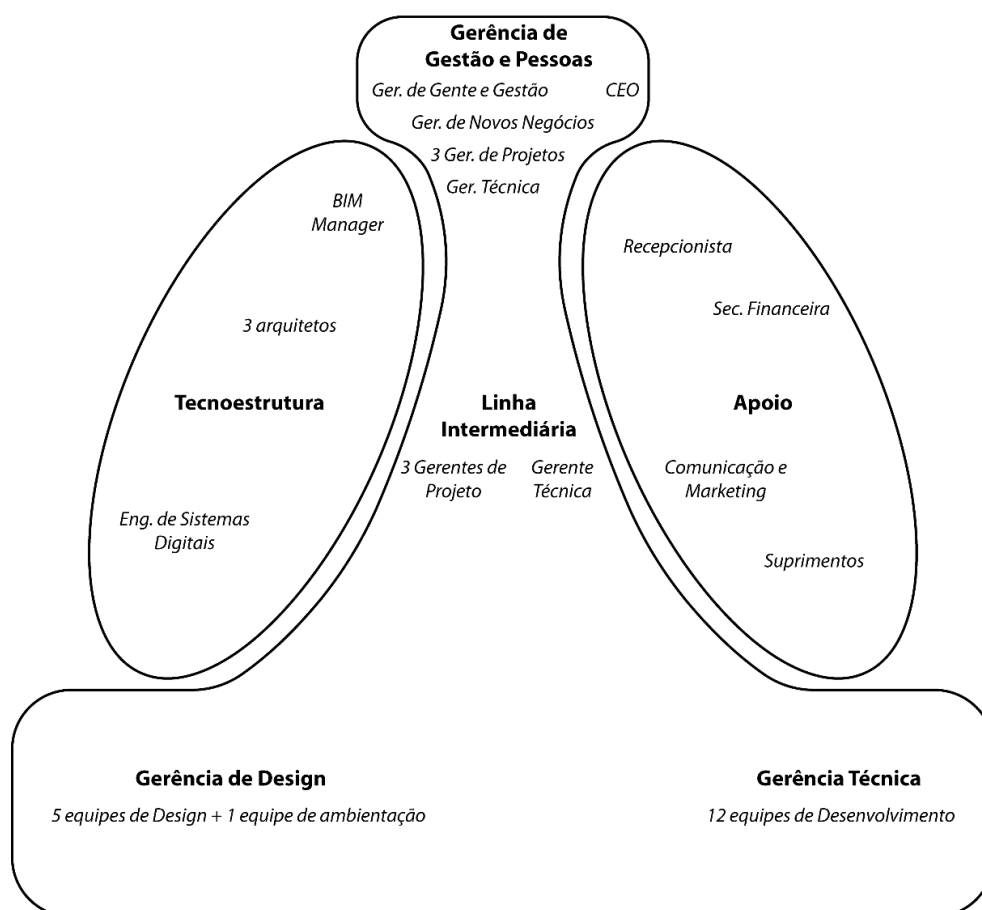
¹⁰ Mintzberg (2009) utiliza o termo “analista” para se referir aos colaboradores que atuam na tecnoestrutura.

3.3 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DA EMPRESA

A Figura 9 exibe as cinco funções da empresa analisada a partir do diagrama de Mintzberg (2009). Na empresa, a cúpula estratégica é chamada de Gerência de Gestão e Pessoas e é constituída pelo CEO da empresa, o Gerente de Novos Negócios, a Gerente de Gente e Gestão, a Gerente Técnica e os três Gerentes de Projetos da empresa.

A Gerente Técnica e os Gerentes de projeto exercem também a função de linha intermediária entre a cúpula estratégica e o núcleo operacional. Desse modo, a Figura 9 exibe os profissionais nessas duas áreas.

Figura 9 – Estrutura organizacional da empresa analisada



Fonte: Autor (2021).

A equipe de apoio é formada por uma recepcionista, uma secretária financeira, um responsável pela infraestrutura da empresa e um funcionário responsável pela comunicação nas mídias sociais da empresa.

O núcleo operacional é dividido entre a Gerência de Design e a Gerência Técnica. O primeiro grupo é formado por cinco equipes de projeto, que atuam nas etapas referentes à viabilidade do produto e à concepção arquitetônica, e uma equipe de ambientação, responsável pelos projetos de interiores, paisagismo e luminotécnica.

A Gerência Técnica é formada por doze equipes de projetos que atuam nas etapas referentes ao desenvolvimento do projeto, como estudo preliminar, anteprojeto e projeto executivo.

Em média as equipes de Design são constituídas por três funcionários cada, sendo um arquiteto líder junto com outros dois arquitetos e/ou estagiários. As equipes da Gerência Técnica são formadas, em média, por um líder com mais quatro colaboradores. A equipe de ambientação é formada por um líder arquiteto em conjunto com outros 13 colaboradores.

Até julho de 2020, a empresa não possuía uma equipe de tecnoestrutura. O suporte técnico à modelagem e a execução das simulações eram de responsabilidade do *BIM Manager* da empresa. Como será discutida posteriormente por esta pesquisa, essa situação acabava sobrecarregando o *BIM Manager* e pouco contribuía para o processo de projeto ou para a disseminação do conhecimento.

A tecnoestrutura é um time que desenvolve processos, métodos e boas-práticas e capacita as pessoas para usarem esses processos, tecnologias e boas-práticas. Antes a gente não tinha uma tecnoestrutura, ou então a tecnoestrutura fazia parte de algum processo específico; a cada nova demanda que surgia, tínhamos uma pessoa para dar o suporte. Agora é uma tecnoestrutura, é um time que desenvolve processos, faz pesquisa etc. e coloca à disposição das pessoas para as pessoas usarem na operação (CEO DA EMPRESA, 2020).

A tecnoestrutura surgiu a partir da visão estratégica da empresa, que priorizou a implementação de novos métodos, procedimentos e boas-práticas em seu processo de projeto. Essa equipe elaborou as estratégias para a implementação da coordenação e compatibilização de projetos por meio da tecnologia BIM e do software Solibri, além da implementação da simulação de desempenho lumínico no processo de projeto da empresa. Esse último item é analisado e discutido por esta pesquisa.

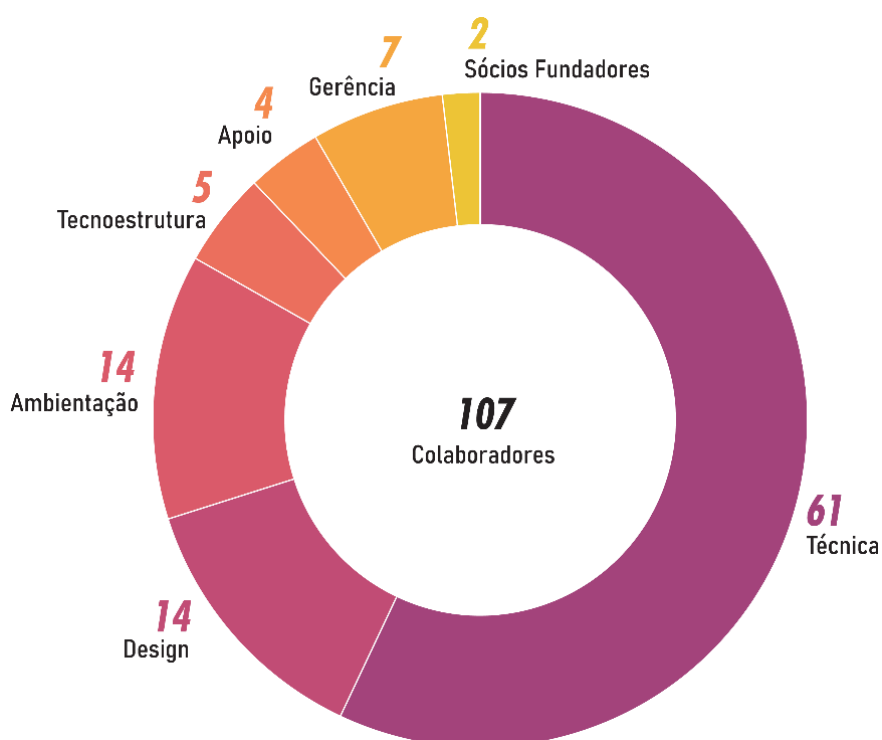
Compõem a equipe de tecnoestrutura: o *BIM Manager*, que possui formação em arquitetura, mestrado em arquitetura sustentável e grande experiência na

coordenação de projetos; um engenheiro de sistemas digitais, com formação em engenharia mecânica e que possui conhecimentos em diversas linguagens computacionais como Python e C#; e outros três arquitetos¹¹ com formação em modelagem paramétrica, fabricação digital, tecnologia BIM e programação, além de conhecimento em softwares como: Rhinoceros, Grasshopper, Solibri, Archicad e Revit.

Atualmente, os dois sócios fundadores atuam na etapa de definição do partido arquitetônico e não necessariamente da gestão diária do escritório, cargo que é hoje exercido pelo CEO.

Deste modo, o Gráfico 1, que demonstra o quantitativo dos colaboradores da empresa¹² por área de atuação, exibe os sócios fundadores em um grupo separado. O gráfico também distingue a equipe de ambientação das equipes de design que, embora façam parte da mesma gerência, atuam em etapas distintas do processo de projeto.

Gráfico 1 – Quantitativo dos colaboradores da empresa por área de atuação



Fonte: Autor (2021).

¹¹ Um desses arquitetos é o autor desta pesquisa.

¹² Dados referentes ao mês de janeiro de 2021.

As doze equipes de desenvolvimento (Técnica) são formadas por 61 funcionários, o que corresponde a 57% do total de colaboradores da empresa. As cinco equipes de concepção (Design) são constituídas por 14 funcionários, ou 13% dos funcionários da empresa.

O quantitativo dos colaboradores da empresa exprime as particularidades do processo de projeto em arquitetura. Enquanto o estudo de viabilidade e a concepção são desenvolvidas em períodos curtos, o desenvolvimento do projeto é distribuído em ciclos mais alongados.

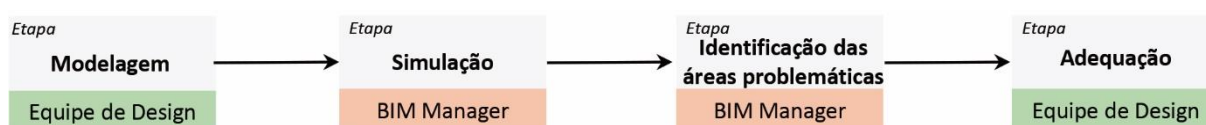
3.4 PROCESSO DE PROJETO ANTERIOR À IMPLEMENTAÇÃO

Na empresa analisada, o BIM *Manager* sempre foi o responsável pela execução das análises de desempenho lumínico. De fato, esse profissional possui vasta experiência profissional na consultoria de projetos visando à obtenção de certificações de sustentabilidade, na análise e concepção de projetos visando ao conforto ambiental e mestrado em arquitetura sustentável.

Porém, essa conjuntura ocasionava uma fragmentação no processo de projeto, como representado pela Figura 10. A equipe de design, responsável pela concepção, executava a modelagem preliminar do projeto e encaminhava o modelo ao BIM *Manager* para que esse pudesse executar a análise de desempenho.

Por sua vez, o BIM *Manager* realizava a simulação, identificava as possíveis áreas que não atingiram o desempenho exigido e reencaminhava o projeto para a equipe de design, que seria a responsável pela sua adequação.

Figura 10 – Processo de projeto anterior à implementação



Fonte: Autor (2021).

De fato, o BIM *Manager* é o responsável por uma série de questões relativas ao processo de projeto auxiliado pela tecnologia BIM. Esse profissional desempenha um papel fundamental dentro de uma empresa de projetos aprimorando procedimentos internos, boas-práticas e assistindo às equipes do núcleo operacional.

As tarefas que devem ser realizadas exclusivamente pelo *BIM Manager* encontram-se ligadas à coordenação e ao gerenciamento de projetos. Dificilmente esse profissional trabalha na produção ou modelagem do projeto.

Desse modo, o *BIM Manager* não deve ser o responsável pela execução das simulações de desempenho lumínico. O encarregado deve ser alguém do núcleo operacional, preferencialmente da equipe que está desenvolvendo o projeto.

Além de sobrecarregar o *BIM Manager*, esse sistema ocasiona uma grande latência durante o desenvolvimento do projeto e pouco contribui para a disseminação do conhecimento sobre desempenho lumínico, visto que os profissionais das equipes de design dependiam da disponibilidade do *BIM Manager* para executar as simulações. Portanto, não desenvolviam o domínio necessário para projetar visando o desempenho lumínico.

Apontando outro inconveniente de aspecto tecnológico, as análises eram desenvolvidas por meio do software VELUX Daylight Visualizer. Embora seja um programa de computador bastante utilizado no mercado, essa ferramenta não permite a interoperabilidade com a tecnologia BIM e não permite o acesso ao seu código fonte.

Isso significa que o usuário não consegue alterar grande parte dos parâmetros de execução das análises, permanece preso a pré-configurações de execução, resolução e qualidade da imagem e não consegue adaptar a ferramenta ao seu uso.

3.5 PROCESSO DE PROJETO PROPOSTO

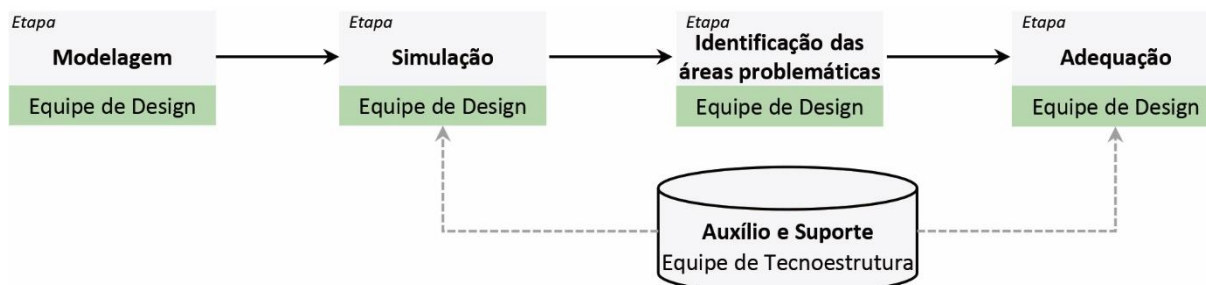
O processo de projeto proposto visa a: resolver os problemas de latência durante as etapas de desenvolvimento do projeto; solucionar problemas de interoperabilidade entre softwares e difundir do conhecimento sobre desempenho lumínico.

Nesse processo, representado pela Figura 11, a equipe de design será responsável pela execução de todas as suas etapas, de modo a otimizar o processo de projeto e resolver o tempo de latência observado.

O papel do *BIM Manager* será substituído pela atuação da equipe de tecnoestrutura no auxílio e suporte durante as etapas de simulação e adequação. Essa mudança contribuirá para a disseminação do conhecimento sobre simulação computadorizada

e desempenho lumínico nas equipes de projeto, de modo que a tecnoestrutura deverá realizar treinamentos e desenvolver documentos de apoio às análises.

Figura 11 – Processo de projeto proposto



Fonte: Autor (2021).

De fato, o processo de projeto proposto provoca uma grande mudança no desenvolvimento das análises de desempenho lumínico, tornando-se necessário criar um ambiente propício, que facilite a execução dessa mudança e contribua para o seu sucesso.

O método TPPG de implementação, proposto por esta pesquisa e fundamentado em tecnologia, processo, pessoas e gestão deve proporcionar a atmosfera necessária para executar essa mudança.

É esperado que as tecnologias escolhidas para essa implementação favoreçam a interoperabilidade entre softwares e a adequação da simulação às etapas de desenvolvimento do projeto. Almeja-se que o processo escolhido facilite a operacionalização da tecnologia, aspira-se que o material de apoio e a assessoria da tecnoestrutura facilite a execução desse processo pelos colaboradores das equipes de design e por fim, espera-se que esse método contribua para a qualidade do projeto.

4 IMPLEMENTAÇÃO

Três colaboradores da equipe de tecnoestrutura foram responsáveis por elaborar a implementação da simulação visando ao desempenho lumínico no processo de projeto da empresa: o BIM *Manager*, o engenheiro de sistemas digitais e o autor desta pesquisa. Juntos estes profissionais possuem conhecimentos em sustentabilidade, simulação computadorizada, programação e modelagem paramétrica.

Este capítulo trata de um relato de experiências, com viés de pesquisa aplicada. Serão detalhados os procedimentos adotados, testes realizados, as dificuldades e os desafios do processo de implementação, que começou a ser desenhado em julho de 2020.

4.1 TECNOLOGIA

Durante a implementação da tecnologia BIM, a empresa adotou o Archicad como a principal ferramenta de desenvolvimento de projetos. Atualmente, todas as etapas do projeto são desenvolvidas com o auxílio desta ferramenta. Assim, todos os colaboradores do núcleo operacional da empresa possuem conhecimento neste software.

A Gerência de Design, responsável pelo estudo de viabilidade e pelas fases relacionadas à concepção do projeto, trabalha concomitantemente com outros dois softwares, o Lumion, para a renderização de imagens, e o Rhinoceros.

O Rhinoceros é utilizado por alguns integrantes da Gerência de Design durante a etapa de modelagem dos edifícios do entorno do projeto. Nessa etapa, a equipe realiza um *download* de um arquivo .3dm¹³ do CADMapper¹⁴, um banco de dados que possui a topografia e a volumetria dos edifícios e das construções de diversas cidades ao redor do mundo.

¹³ A extensão de arquivo .3dm é nativa do software Rhinoceros.

¹⁴ <https://cadmapper.com/> Acesso: 12 de março de 2021.

Após a transferência do arquivo, a equipe verifica se as informações contidas no modelo de entorno estão atualizadas, como a altura dos edifícios do entorno e a topografia.

Para verificar se a topografia está correta, a equipe compara o modelo do entorno com o levantamento cadastral e topográfico do projeto, e para averiguar se todos os edifícios estão modelados, a equipe utiliza o Google Street View como recurso. Caso seja necessário, a equipe deve editar a geometria do modelo para corresponder à situação atual do entorno. Após a edição, a geometria do entorno é transferida para o Archicad, software utilizado nas demais etapas do projeto.

Para o desenvolvimento das análises de desempenho lumínico, a equipe de tecnoestrutura optou pela criação de um algoritmo de simulação por meio do Grasshopper. A escolha desse método de implantação foi norteada por: i) conhecimento prévio da equipe de tecnoestrutura em programação computacional e em modelagem paramétrica; ii) conhecimento prévio de alguns integrantes da gerência de design em Rhinoceros; iii) interoperabilidade com o Archicad; iv) integração com *plug-ins* e ferramentas de simulação e v) adaptabilidade do algoritmo às necessidades do projeto e da empresa.

4.1.1 Algoritmo

O método de implantação de uma tecnologia no processo de projeto de uma empresa deve considerar os objetivos da implementação, a inserção dessa tecnologia em um processo e a operacionalização deste processo pelos colaboradores da empresa.

A programação algorítmica é ainda um assunto muito distante para grande parte dos arquitetos e urbanistas. A inserção dessa tecnologia em empresas de projeto arquitetônico demanda cuidados e ponderações, de modo que o algoritmo deve favorecer o processo de projeto e não travar seu desenvolvimento.

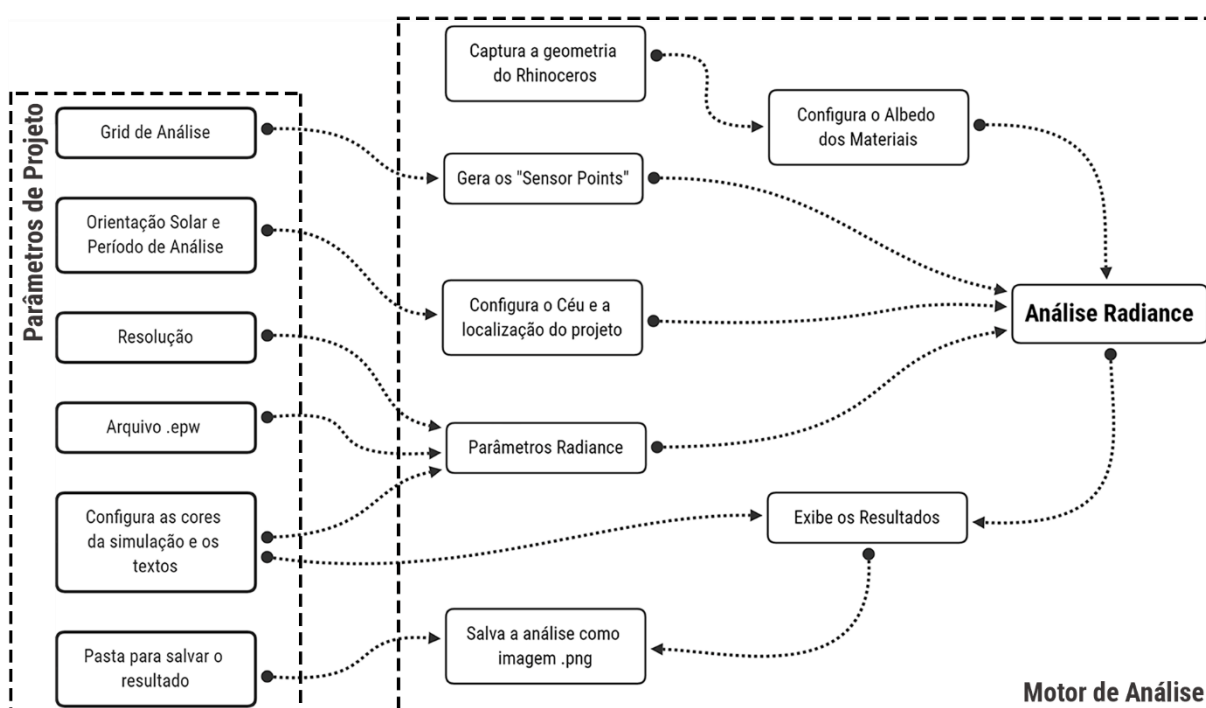
Para contornar essa barreira, a equipe de tecnoestrutura desenvolveu um algoritmo em que todas as conexões entre componentes foram previamente estabelecidas, ou seja, a programação já havia sido concluída e as configurações do algoritmo já estavam definidas. Desse modo, caberia às equipes de design a inserção das

informações relativas ao projeto como localização, orientação solar, período de análise e ambientes de análise.

Para a simulação de desempenho lumínico, a equipe de tecnoestrutura objetivou a criação de um algoritmo padrão capaz de analisar o desempenho lumínico de qualquer projeto da empresa sem a necessidade de grandes ajustes. Era importante que esse algoritmo se comportasse como um arquivo *template*, em que todas as preferências e definições estivessem previamente definidas e disponíveis ao uso.

O algoritmo proposto foi dividido em duas partes principais: i) os parâmetros de projeto, que devem ser configurados pelas equipes de design de acordo com cada projeto, e ii) o motor de análise, a parte “fixa” do algoritmo, que não demanda ajustes, e é utilizada para todos os projetos. A Figura 12 exibe um diagrama explicativo destas duas partes.

Figura 12 – Diagrama explicativo do Algoritmo



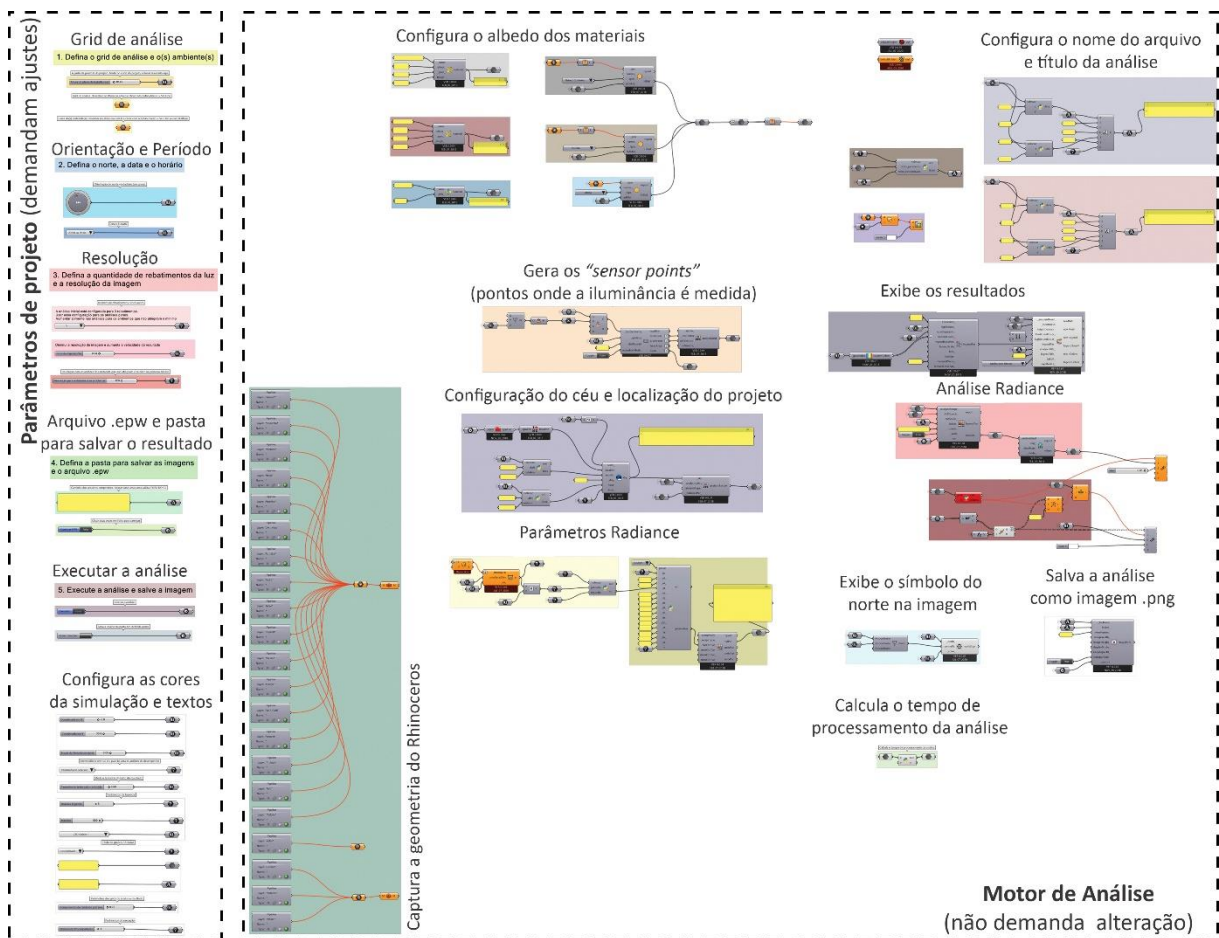
Fonte: Autor (2021).

Os parâmetros de projeto devem ser ajustados a cada nova simulação. São configurações relativas ao grid de análise; à orientação solar; ao período de análise; à resolução da simulação; ao arquivo de dados bioclimáticos (epw); aos textos e cores da análise e à pasta de salvamento da análise.

O motor de análise captura a geometria do projeto no Rhinoceros, configura o albedo dos materiais do projeto, gera os “*sensors points*”, pontos onde o nível de iluminância é medido, configura o céu da análise, executa a análise por meio dos parâmetros do Radiance, exibe os resultados e salva a análise como imagem (.png).

O algoritmo desenvolvido é apresentado pela Figura 13. Sua programação utilizou componentes nativos do Grasshopper como o “Geometry Pipeline”, que captura a geometria disponível no Rhinoceros de acordo com o *layer* especificado e componentes de duas ferramentas do Ladybug Tools: i) o Ladybug, usado para análise do arquivo epw, na configuração do tipo de céu da análise, na definição do grid de análise, na exibição dos resultados e no salvamento da análise em arquivo de imagem; e ii) o Honeybee, utilizado para configurar o albedo dos materiais e para configurar os parâmetros de execução da análise no Radiance.

Figura 13 – Algoritmo desenvolvido



Fonte: Autor (2021).

O Radiance é o software utilizado para a execução das análises de iluminação, o Honeybee é o *plug-in* que faz a comunicação com este programa, e possibilita que a simulação seja executada dentro da interface do Rhinoceros/Grasshopper.

A maior dificuldade do processo de desenvolvimento desse algoritmo foi a calibragem dos 14 parâmetros do Radiance. Esses parâmetros, exibidos pelo Quadro 2, definem o comportamento dos feixes de luz, o erro percentual admitido em cada simulação, a resolução da análise e o método de cálculo. Cada parâmetro pode influenciar a qualidade, a resolução, a precisão e o tempo de processamento da análise.

Quadro 2 – Parâmetros de controle de luz e ambiente utilizados no Radiance

Parâmetro	Descrição	Efeito no tempo de execução
-ab <i>ambient bounces</i>	Define o número de rebatimentos de luz difusas que serão computadas. Números mais altos são mais precisos.	Direto, dobrar este valor pode dobrar o tempo de renderização.
-ad <i>ambient divisions</i>	Define o número de divisões no cálculo da iluminação ambiente. Um valor de zero não implica nenhum cálculo indireto.	Direto, dobrar este valor pode dobrar o tempo de renderização.
-as <i>ambient super-samples</i>	Especifica o número máximo de raios adicionais a serem rastreados pela divisão do ambiente. Números mais altos são mais precisos	Direto, adiciona efetivamente ao parâmetro -ad e a seu tempo de processamento.
-ar <i>ambient resolution</i>	Especifica a densidade dos pontos de cálculo do ambiente.	Direto, o efeito depende da cena, dobrar este valor pode quadruplicar o tempo de renderização.
-aa <i>ambient accuracy</i>	Determina o erro percentual admitido nos cálculos de iluminação.	Direto, dobrar este valor pode quadruplicar o tempo de renderização.
-dj <i>source jitter</i>	Controla a suavidade e a precisão das sombras e penumbras. Quanto maior este valor, mais suaves serão as penumbras.	Indireto.
-ds <i>source substructuring</i>	Fração que indica a subdivisão das fontes de luz, de modo a garantir maior precisão nos pontos adjacentes às áreas iluminadas.	Inverso, reduzir este valor pela metade, faz com que o tempo de renderização duplique.
-dt <i>direct thresholding</i>	O valor mínimo de luz que uma fonte de luz deve ter para ser testada quanto as sombras. Um valor zero significa que todas as fontes de luz serão testadas quanto às sombras.	Inverso, reduzir este valor pela metade, faz com que o tempo de renderização aumente cerca de 50%.
-dc <i>direct certainty</i>	Garante que a precisão do cálculo será igual ou melhor ao valor do parâmetro -dr.	Direto, afeta o tempo de renderização em até 50%.
-dr <i>direct relays</i>	Define o número de rebatimentos das fontes secundárias.	Direto, dependendo da cena, cada novo rebatimento pode dobrar o tempo.
-dp <i>direct pretest density</i>	Estipula o número de amostras que serão usadas para determinar com antecedência, se vale ou não a pena, seguir com os raios por todas as reflexões e/ou transmissões.	Menor, afeta apenas o tempo de inicialização.
-st <i>specular threshold</i>	Define a fração mínima de reflexão ou transmissão, sob a qual nenhuma amostragem especular é realizada.	Menor, um valor igual à zero pode aumentar o tempo de renderização em 50%.
-lr <i>limit reflection</i>	Define o número máximo de raios especulares, refletidos e refratados, que podem ser gerados.	Menor, o aumento acarreta em um tempo de renderização ligeiramente maior.
-lw <i>limit weight</i>	A função de peso para a geração de raios especulares. Se a quantidade medida for menor que o peso mínimo especificado, raios adicionais não serão rastreados.	Menor, a diminuição acarreta em um tempo de renderização ligeiramente maior.

Fonte: Desktop Radiance 2.0 Beta User Manual (2020) e Setting Rendering Options (2020). Montagem da Tabela feita pelo Autor (2021, tradução nossa).

As métricas de simulação, que englobam os parâmetros de comportamento dos feixes de luz, o albedo dos materiais opacos e o índice de transmissão visual das superfícies translúcidas, devem ser ajustadas com cuidado por profissionais com treinamento e seguindo parâmetros conhecidos de refletância, absorvância e transmissão visual. Valores incongruentes, que não refletem o comportamento dos materiais ou da luz podem gerar resultados imprecisos, como alertado por Brembilla; Hopfe; Mardaljevic (2018).

A configuração dos parâmetros de luz do Radiance demandou o estudo sobre métodos de análise de iluminância e sobre o funcionamento do software. Esse embasamento teórico foi alcançado por meio da consulta às teses de Mardeljevic (2000) e Jones (2017).

A tese de Dornelles (2008) foi utilizada para ajustar os níveis de refletância (albedo) das alvenarias revestidas por pinturas acrílicas ou látex, o boletim técnico produzido por Ferreira e Prado (2003) foi utilizado para ajustar o mesmo índice para outros materiais presentes na construção civil, como cerâmicas, concreto e alumínio e o doutorado de Assis (1998) foi utilizado na configuração da transmitância visual dos vidros.

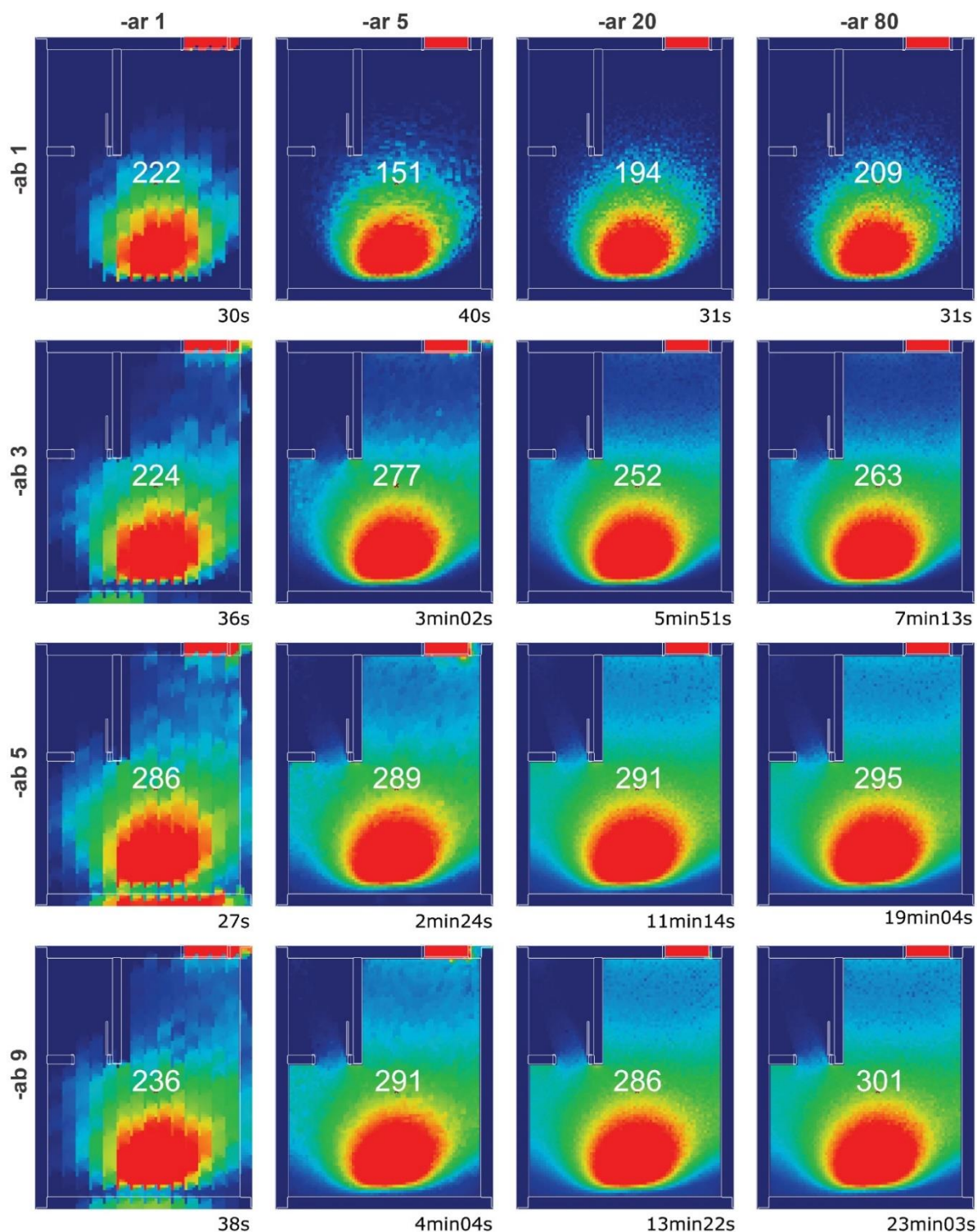
Para que o algoritmo fosse implementado no processo de projeto da empresa, era impreterível que grande parte das configurações de análise estivessem predefinidas. Após a análise do funcionamento dos parâmetros de simulação, a equipe de tecnoestrutura realizou uma série de testes que objetivaram a calibragem dos parâmetros de execução junto ao tempo de processamento da análise.

A precisão da análise e o tempo de processamento do computador são duas variáveis muito importantes. Simulações com alto nível de precisão podem provocar um altíssimo tempo de processamento e demandar várias horas ou até mesmo dias para serem calculadas, inviabilizando a inserção no processo de projeto da empresa. Por outro lado, simulações muito rápidas podem apresentar elevados níveis de imprecisões, produzindo resultados incongruentes. O erro percentual admitido para as simulações deve ser ponderado, de modo a evitar erros de diagnóstico e diminuir o risco de não atendimento às normas de desempenho.

Os ajustes dos parâmetros demorou cerca de três meses. Nesse período, a tecnoestrutura realizou uma série de testes com diferentes configurações de

parâmetros e em diferentes tipologias de plantas. A equipe analisou o resultado em lux obtido em cada análise e o tempo de execução. Na Figura 14 é possível observar parte desses testes: 16 análises de desempenho lumínico com diferentes valores para os parâmetros -ar (resolução) e -ab (rebatimentos).

Figura 14 – Testes com diferentes configurações de resolução e rebatimentos

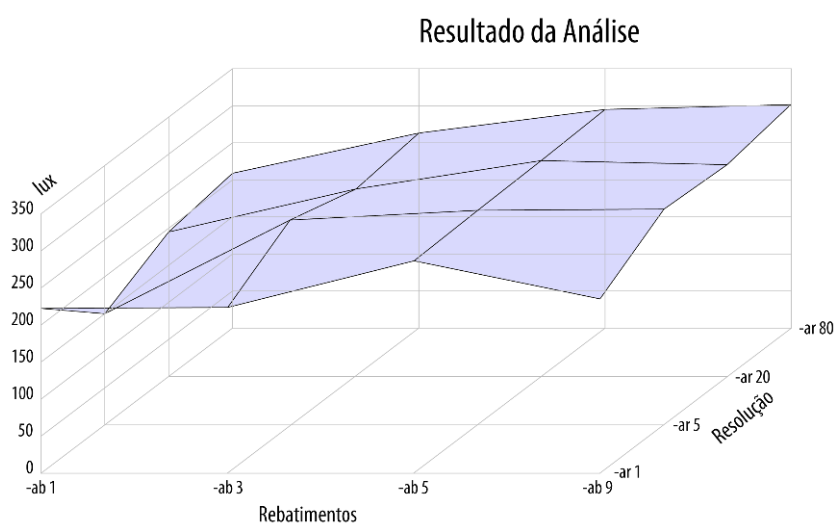


Fonte: Autor (2021).

Nota-se que a definição de valores muito baixos para o parâmetro -ar produz análises muito rápidas, com tempo de processamento inferior a um minuto. Visualmente as simulações ficam com aspecto pouco harmônico, com grandes manchas de luz e sombra e alguns erros de processamento junto às paredes do ambiente. O erro é ainda mais evidente em simulações com *grid* de análise maior.

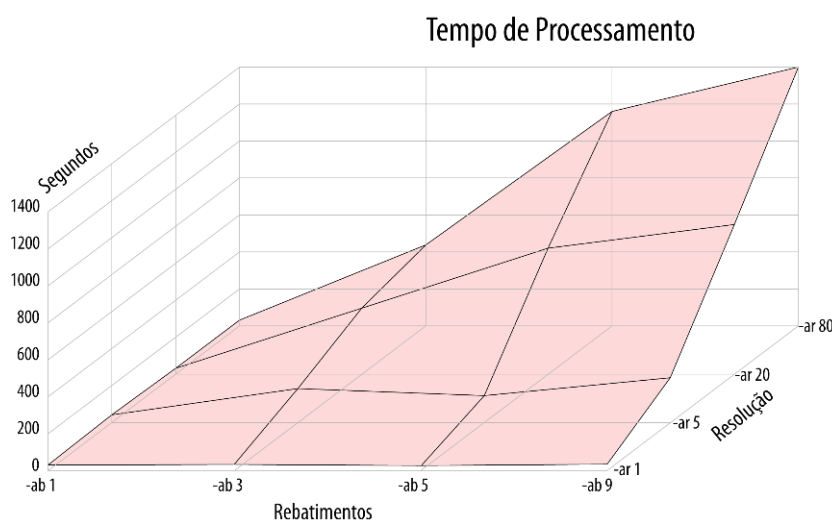
Foi constatado que valores muito altos para o parâmetro -ab provocam grandes acréscimos no tempo de processamento, mas pouco influem no resultado da análise. Essa constatação pode ser verificada nos Gráficos 2 e 3, onde o tempo de processamento e os resultados da análise são comparados com o valor de -ar e -ab.

Gráfico 2 – Comparativo dos resultados obtidos nos 16 testes



Fonte: Autor (2021).

Gráfico 3 – Comparativo do tempo de processamento nos 16 testes



Fonte: Autor (2021).

O Gráfico 2 compara os valores dos parâmetros -ar e -ab com o valor obtido em cada análise em lux. Nota-se uma estabilidade entre os resultados obtidos a partir de cinco rebatimentos de luz (-ab 5). Verifica-se que o gráfico assume uma geometria parecida com um patamar, com pouca variação entre os resultados.

Do mesmo modo, o Gráfico 3 exhibe o impacto desses dois parâmetros no tempo de processamento da análise. Observa-se que de fato existe uma relação direta entre o tempo de cálculo e o valor para esses dois índices, fazendo com que o gráfico assumira a geometria de um aclave.

Essa divergência está associada à intensidade dos feixes de luz refletidos e ao albedo dos materiais especificados para o ambiente. O albedo é o coeficiente de reflexão de luz difusa e indica a fração de luz solar que é refletida pelos materiais. Quanto maior esse índice, maior a quantidade de luz refletida.

Porém, a cada nova reflexão a intensidade da luz diminui, pois parte da radiação é absorvida pelos materiais do ambiente. Isso significa que um feixe de luz, após um grande número de rebatimentos, terá uma intensidade muito baixa e pouco contribuirá para o resultado da análise, como indicado pelo Gráfico 2.

Embora não contribua muito para o resultado, o algoritmo irá calcular todos os rebatimentos de feixes de luz definidos pelo usuário. Isso faz com que o tempo de processamento aumente consideravelmente, como demonstrado pelo Gráfico 3.

A equipe de tecnoestrutura concluiu que a predefinição desses dois parâmetros poderia produzir simulações muito demoradas devido à alta densidade dos pontos de análise (-ar) e ao alto número de rebatimentos de feixes de luz (-ab) ou, ainda, em análises pouco precisas devido ao baixo valor destes mesmos parâmetros.

Assim, a tecnoestrutura preferiu fixar os valores dos outros 12 parâmetros do Radiance – configurações que definem, por exemplo, a precisão do cálculo, a suavidade das penumbras e o processamento dos feixes especulares – e decidiu que os índices -ab e -ar deveriam ser configurados pelas equipes de design com o auxílio de um material de apoio e de acordo com a etapa de desenvolvimento do projeto.

Para verificar se os parâmetros de execução estavam produzindo resultados fidedignos, a equipe de tecnoestrutura utilizou o algoritmo desenvolvido para simular alguns projetos da empresa que já haviam sido analisados por consultores externos. A comparação entre os resultados alcançados pelos consultores e pela tecnoestrutura

contribuiu para a calibragem dos parâmetros de execução e para redução das incertezas relativas à simulação digital. Procedimento parecido é recomendado por Hernandez (2015), que discorre sobre a importância de se adotar uma “edificação de referência”: um modelo virtual, onde o nível de desempenho é conhecido e pode ser utilizado como referência para verificar se os resultados produzidos por outras análises, com as mesmas condições de envoltória e fachadas, estão corretos.

4.1.2 Interoperabilidade entre Softwares

A interoperabilidade entre softwares é um assunto de grande importância durante a implementação de novas tecnologias no processo de projeto. Como dito anteriormente, todos os projetos da empresa são desenvolvidos com o auxílio do Archicad. A interoperabilidade deste software com o Rhinoceros/Grasshopper pode ser alcançada por meio de *plug-ins*, como o Archicad Live Connection, ou pela conversão da extensão do arquivo em algum formato que é interpretado por ambos os softwares.¹⁵

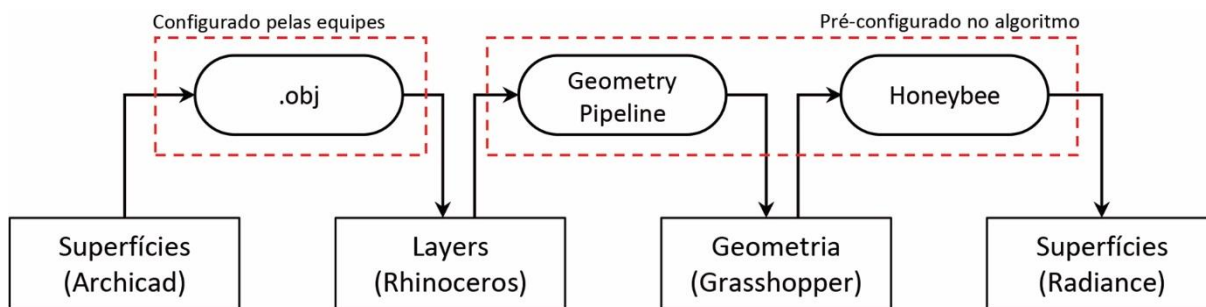
A princípio, a tecnoestrutura objetivou a interoperabilidade por meio do Archicad Live Connection, porém a equipe notou grande dificuldade na conversão das superfícies do Archicad em superfícies de análise que são posteriormente interpretadas pelo Radiance. O procedimento necessário para contornar esse problema demandaria a reconstrução de parte da geometria do projeto, o que inviabilizaria o processo de projeto.

Desse modo, a tecnoestrutura optou por um método baseado na conversão do arquivo .pln do Archicad em um arquivo .obj, como observado pela Figura 15. O arquivo .obj armazena dados sobre a geometria e as superfícies¹⁶ utilizadas em cada elemento do modelo do Archicad.

¹⁵ O Archicad possibilita a conversão de seus arquivos (.pln) em 32 formatos, deste total, 10 extensões podem ser abertas no Rhinoceros: .3dm; .3ds; .dae; .dgn; .dwg; .dxf; .kmz; .obj; .skp; .stl

¹⁶ No Archicad, a definição dos materiais é feita por meio da ferramenta “Superfície”.

Figura 15 – Processo de criação das superfícies de análise



Fonte: Autor (2021).

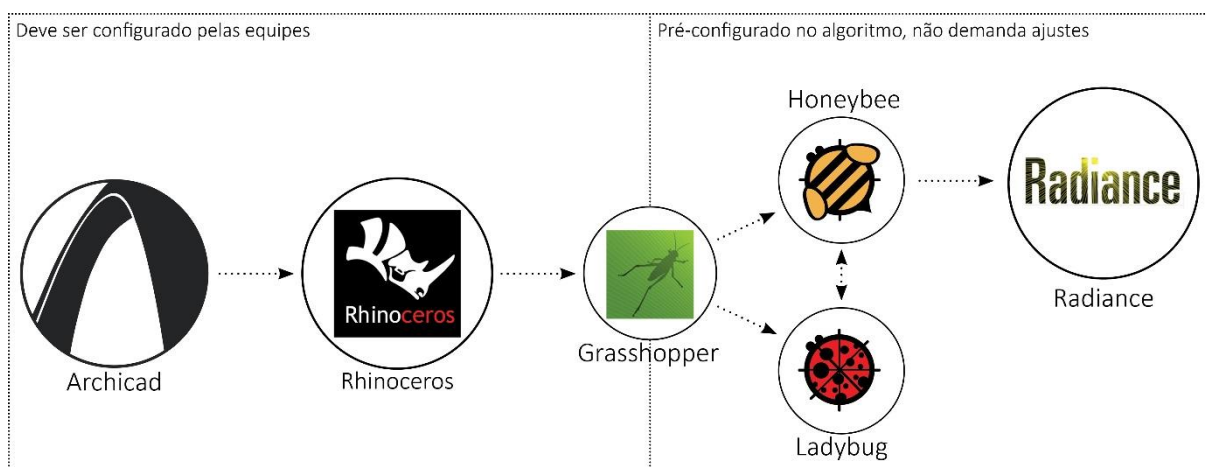
O Rhinoceros: i) interpreta os dados da geometria e dos materiais contidos no arquivo .obj; ii) cria e nomeia um conjunto de *layers* de acordo com os materiais contidos no arquivo e iii) separa os elementos de mesmo material dentro do mesmo *layer*. Dessa forma, para cada superfície de material contida no .obj existirá um *layer* correlato no Rhinoceros.

No algoritmo desenvolvido existem 21 componentes denominados “Geometry Pipelines”. Esses componentes são nativos do Grasshopper e servem para capturar a geometria presente nos *layers* do Rhinoceros, de modo que cada “*Pipeline*” filtra a geometria de um *layer* diferente do Rhinoceros.

O *plug-in* Honeybee interpreta os dados e associa a geometria contida em cada “*Pipeline*” aos índices de refletância predefinidos pela tecnoestrutura. A combinação da geometria com esse índice configura as superfícies do Radiance, que serão usadas na simulação de desempenho lumínico.

A Figura 16 demonstra, visualmente, a sequência de softwares e ferramentas utilizadas nessa implementação. O procedimento adotado objetivou a operação do algoritmo pelas equipes de design, de modo que as configurações que demandam maior conhecimento em programação estão predefinidas no algoritmo e os ajustes que demandam regulagem estão em ferramentas já utilizadas pelas equipes de design.

Figura 16 – Softwares e ferramentas utilizadas na implementação



Fonte: Autor (2021).

4.2 PROCESSO

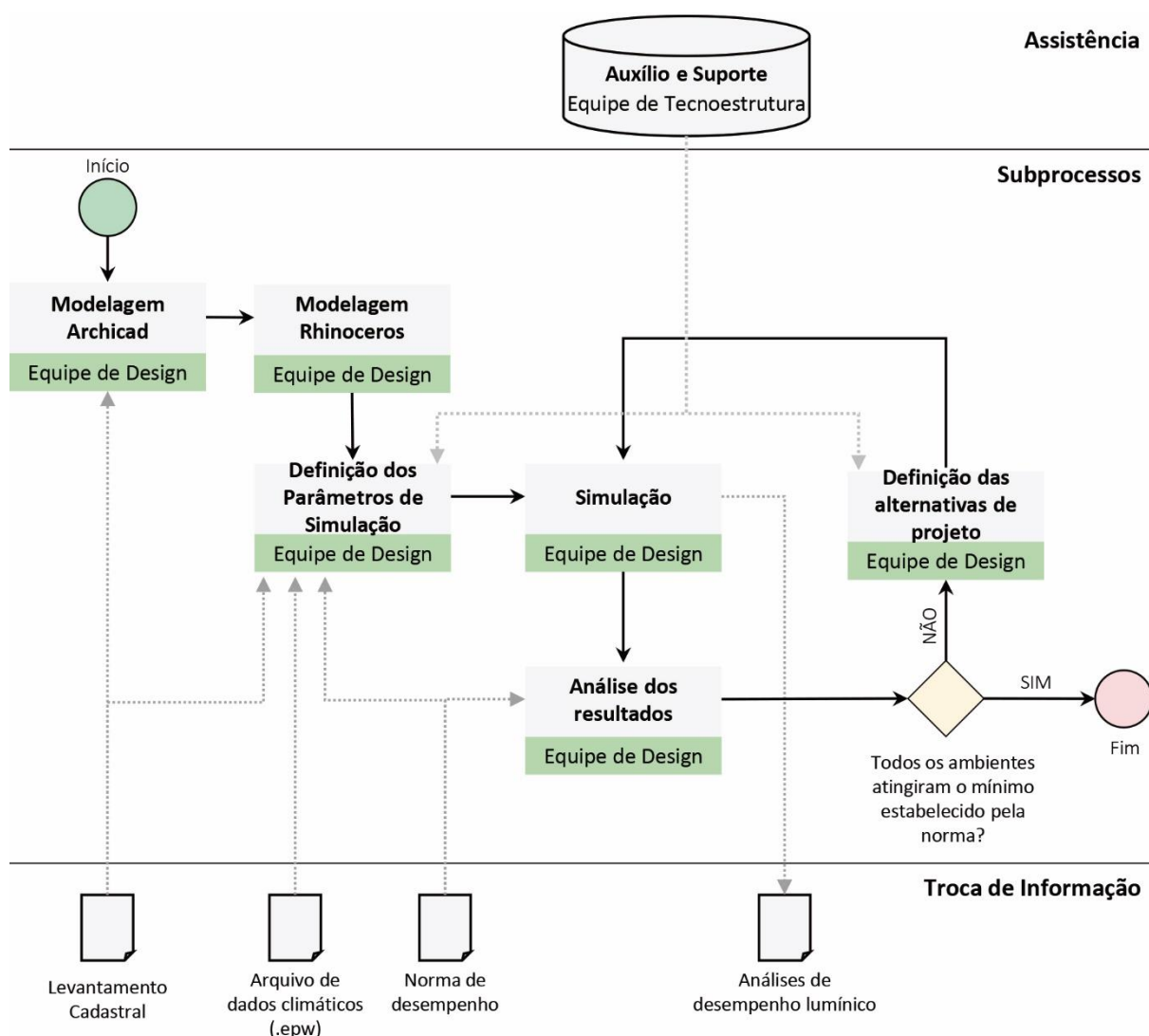
A implementação de novas tecnologias no processo de projeto de uma empresa deve ser estruturada para que os colaboradores da organização consigam operacionalizar a nova ferramenta.

O processo de implementação proposto por esta pesquisa foi dividido em seis subprocessos: i) Modelagem no Archicad; ii) Modelagem no Rhinoceros; iii) Definição dos parâmetros de Simulação; iv) Simulação; v) Identificação de ambientes com problemas de desempenho e vi) Definição das alternativas de projeto, como demonstrado pelo diagrama da Figura 17.

Essa implementação pressupõe que todos os subprocessos serão desenvolvidos pelas equipes de design e objetiva a capacitação das equipes na operacionalização do algoritmo e das demais ferramentas digitais supracitadas e, conseqüentemente, a introdução da simulação de desempenho lumínico no processo de projeto da empresa.

Além dos subprocessos, a Figura 17 exibe outras duas partes do processo, uma denominada “Troca de Informação” e outra, “Assistência”. A primeira, exibida na parte inferior do esquema, apresenta os documentos utilizados nesta implementação, como o levantamento cadastral do terreno, o arquivo de dados climáticos e a Norma de Desempenho, além de mostrar também o resultado dessa implementação: as análises de desempenho lumínico.

Figura 17 – Processo de implementação



Fonte: Autor (2021).

Na parte superior do diagrama, a raia “Assistência” demonstra a atuação da equipe de tecnoestrutura no auxílio às equipes em dois subprocessos estratégicos que demandam maiores conhecimentos em simulação e desempenho lumínico: a definição dos parâmetros de simulação e a definição das alternativas de projeto.

4.2.1 Subprocessos

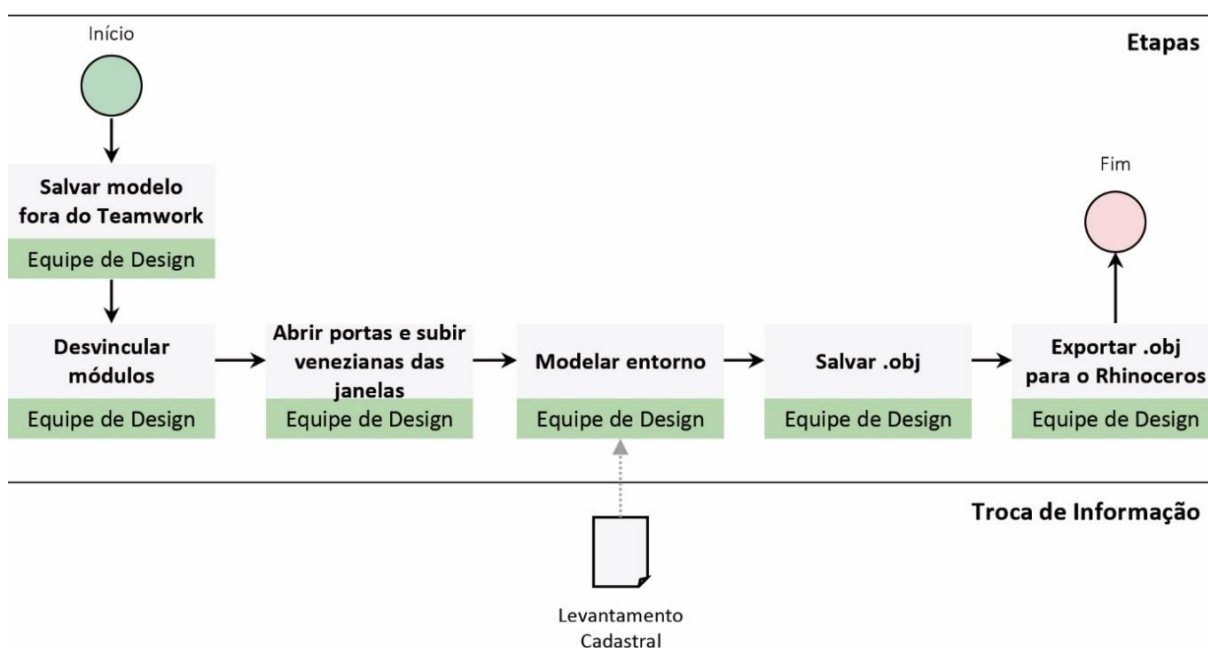
Nessa implementação, os quatro primeiros subprocessos objetivam a preparação do modelo e a execução da análise de desempenho. Foram divididos de acordo com o software ou ferramenta utilizada: Modelagem no Archicad; Modelagem no Rhinoceros; e Definição dos parâmetros de Simulação e Simulação, no Grasshopper.

Os dois últimos subprocessos: Identificação de ambientes com problemas de desempenho e Definição das alternativas de projeto focam na interpretação dos resultados e na definição de melhorias.

4.2.1.1 Modelagem Archicad

O primeiro subprocesso, exposto pela Figura 18, objetiva a preparação do modelo do Archicad, a criação do arquivo .obj e a subsequente exportação do modelo para o Rhinoceros.

Figura 18 – Modelagem Archicad

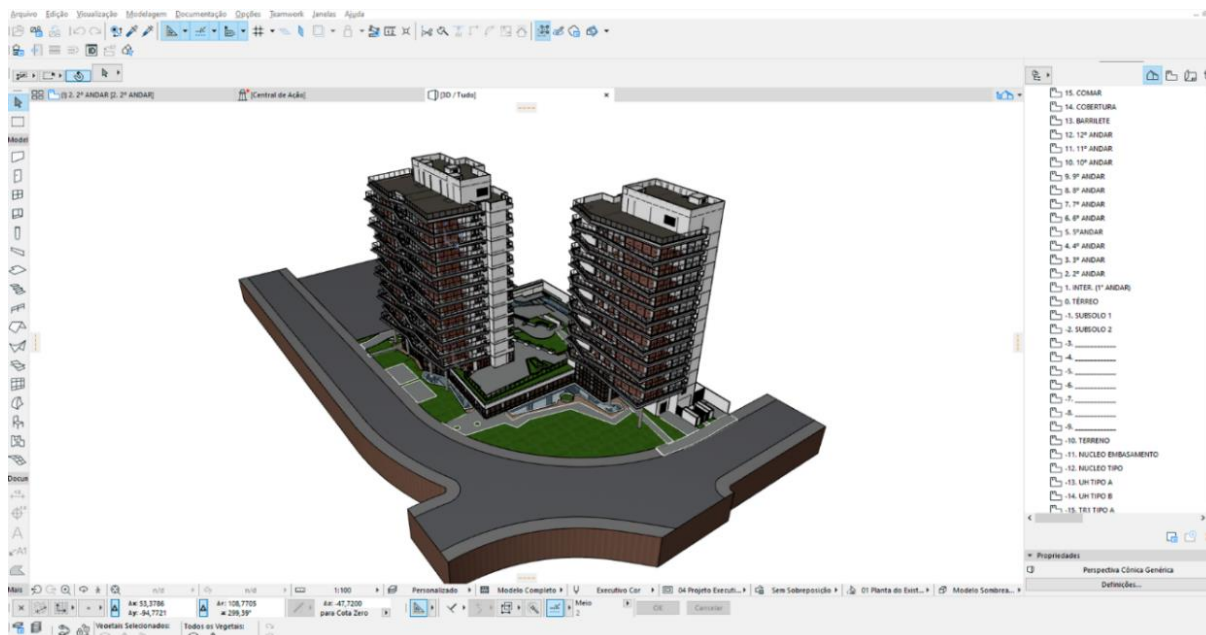


Fonte: Autor (2021).

A Figura 19 exibe um modelo desenvolvido pela empresa de arquitetura na *interface* do Archicad durante o desenvolvimento de um projeto localizado em São José do Rio Preto (SP). O projeto, de 2019, conta com duas torres residenciais com 11 pavimentos cada e foi inteiramente desenvolvido no Archicad com o auxílio do Teamwork.

O Teamwork é uma ferramenta do Archicad que possibilita o trabalho colaborativo e simultâneo. Com esse recurso, diversos usuários conseguem trabalhar ao mesmo tempo no modelo. É um instrumento de grande importância para o desenvolvimento de projetos, pois todas as informações contidas no modelo podem ser acessadas, compartilhadas e editadas por qualquer arquiteto ou projetista da empresa.

Figura 19 – Perspectiva do modelo na *interface* do Archicad



Fonte: Empresa de Arquitetura (2021b).

O processo proposto por esta pesquisa presume algumas edições no modelo com o intuito de facilitar a execução das análises. Dessa forma, a primeira etapa do subprocesso é justamente salvar uma cópia do modelo em uma pasta fora do Teamwork, de modo a proteger as informações contidas no arquivo que serão utilizadas pelos demais membros da equipe durante o desenvolvimento do projeto.

Após o salvamento do arquivo em uma pasta fora do Teamwork, todos os módulos do projeto devem ser desvinculados. Essa etapa facilita a criação dos *layers* no Rhinoceros e a consequente a captura da geometria no Grasshopper.

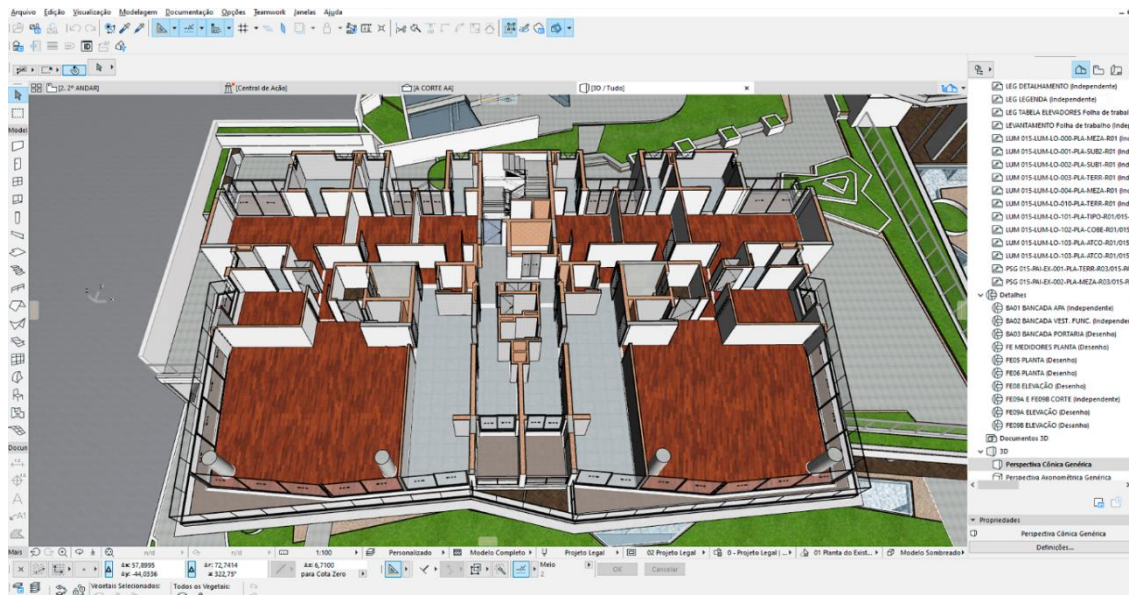
Um dos critérios exigidos pela Norma de Desempenho (ABNT, 2013, p.24) para a execução das simulações de desempenho lumínico é: *“supor desativada a iluminação artificial, sem a presença de obstruções opacas (janelas e cortinas abertas, portas internas abertas, sem roupas estendidas nos varais, etc.).”*

No padrão de documentação de projetos da empresa, as venezianas das janelas aparecem semifechadas e as portas das unidades, fechadas. Por se tratar de um projeto desenvolvido com o auxílio da tecnologia BIM, a documentação de projeto reflete as características geométricas dos elementos inseridos no modelo.

Assim, as equipes devem editar o ângulo de abertura das portas internas da unidade e remover qualquer obstrução das janelas. O modelo deve se assemelhar com o

exibido pela Figura 20, em que todas as portas internas foram abertas, de modo a não comprometer o resultado da análise.

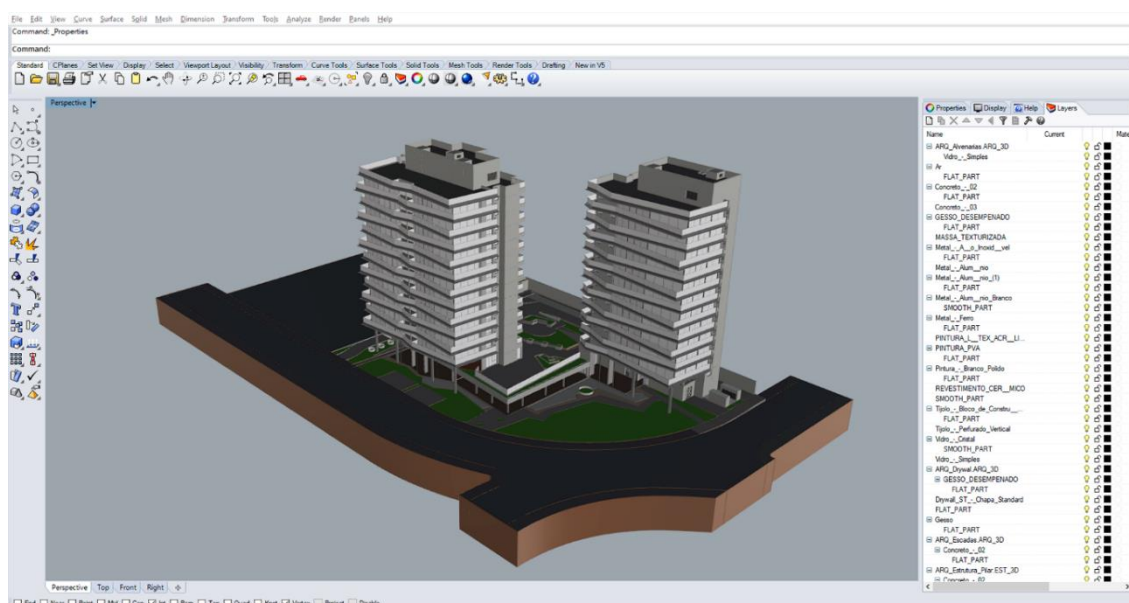
Figura 20 – Perspectiva do 1º Pavimento da torre A do projeto



Fonte: Empresa de Arquitetura (2021b).

Em seguida, o entorno próximo ao projeto deve ser modelado, etapa que pode ser executada com o auxílio do CADMapper, e/ou com a ajuda do levantamento cadastral. Por fim, o modelo deve ser salvo como arquivo .obj e posteriormente exportado para o Rhinoceros, como observado na Figura 21.

Figura 21 – Perspectiva do modelo na interface do Rhinoceros

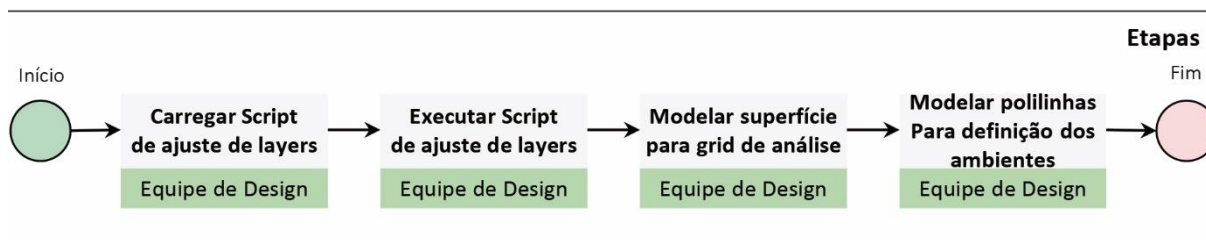


Fonte: Empresa de Arquitetura (2021b).

4.2.1.2 Modelagem Rhinoceros

O subprocesso seguinte, representado pela Figura 22, define as etapas que deverão ser executadas pelas equipes de design no Rhinoceros, a começar pelo carregamento e execução do *script* de ajuste de *layers*.

Figura 22 – Modelagem Rhinoceros



Fonte: Autor (2021).

A equipe de tecnoestrutura observou que após a exportação do arquivo *.obj*, o Rhinoceros cria alguns *sublayers* com as superfícies do Archicad, que dificultam a interpretação da geometria pelos “Geometry Pipelines” do Grasshopper.

Para contornar esse problema, foi desenvolvido um *script* em RhinoScript, uma linguagem de programação baseada na linguagem VBScript¹⁷ da Microsoft que ajusta a ordem e as subcamadas dos *layers* do Rhinoceros.

O Rhinoceros possui uma ferramenta de edição de *scripts* que permite o carregamento e a execução de códigos em RhinoScript e Python. Desse modo, as equipes de design conseguem utilizar o *script* desenvolvido no processo de projeto de forma autônoma.

Em seguida, as equipes devem executar a modelagem de dois elementos no Rhinoceros: uma superfície, que será utilizada como grid de análise, e um conjunto de polilinhas que definirão os ambientes do projeto.

Para auxiliar nessas duas etapas, o algoritmo foi programado para exibir na *interface* do Rhinoceros uma representação em planta do modelo do projeto. Essa representação é definida pelas equipes de design a partir de um *slider* do Grasshopper que define uma coordenada no eixo z do modelo e, conseqüentemente, a cota de

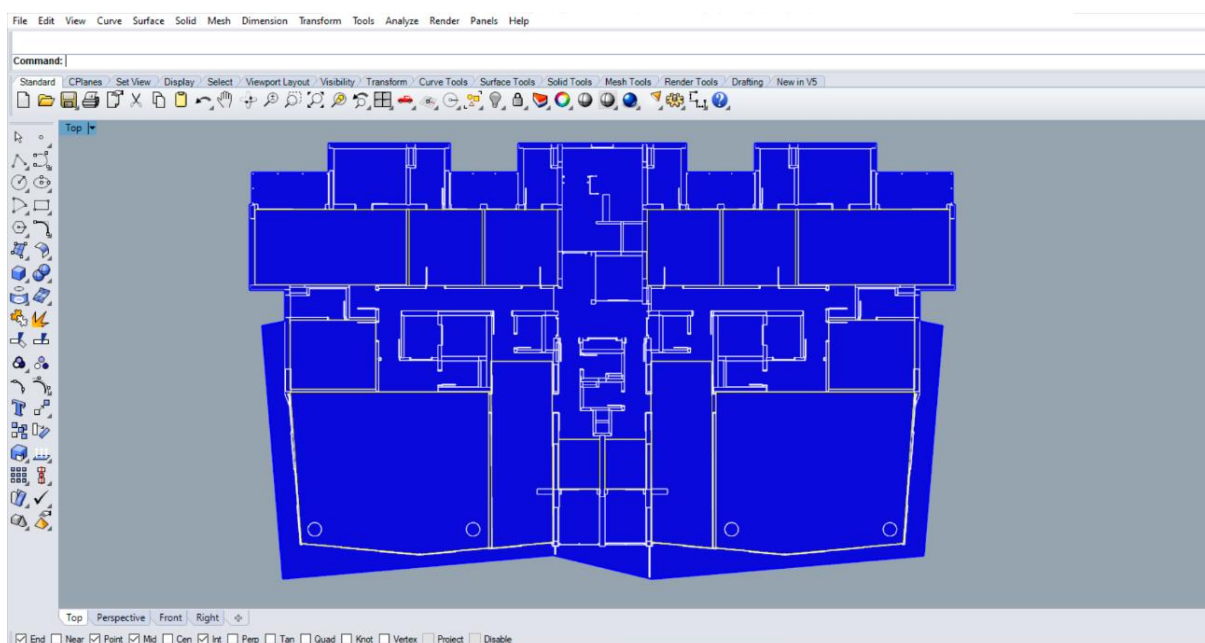
¹⁷ Visual Basic Script

nível do plano de execução da análise. Essa representação é exibida em linhas brancas pela Figura 23.

A superfície modelada pelas equipes deverá compreender todo o pavimento analisado. Essa superfície, exibida em azul pela Figura 23, será utilizada pelo algoritmo para definir o grid e os “*Sensor Points*”, pontos onde a iluminância, em *lux* será medida.

As curvas dos ambientes, representadas em amarelo pela Figura 23, serão utilizadas pelo algoritmo para definir o ponto central do ambiente. Esse ponto, por sua vez, é utilizado para medir o desempenho lumínico atingido pelo ambiente.

Figura 23 – Seção do 1º Pavimento exibida na *interface* do Rhinoceros

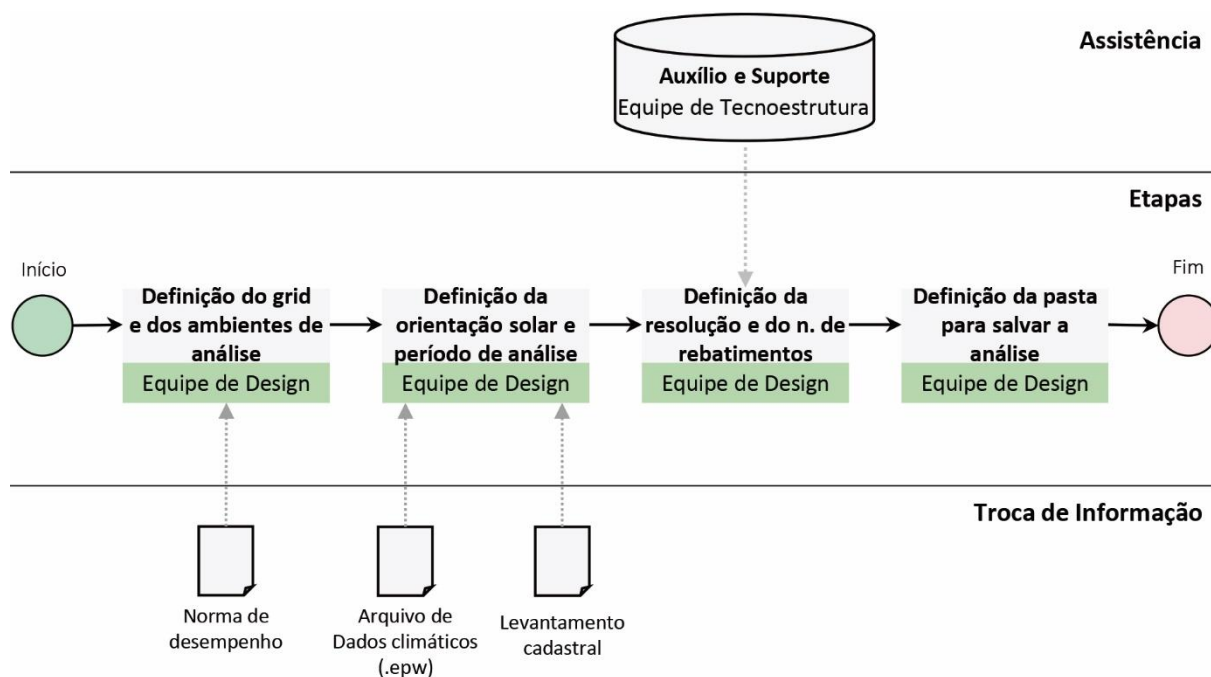


Fonte: Empresa de Arquitetura (2021b).

4.2.1.3 Definição dos Parâmetros de Simulação

Este subprocesso, representado pela Figura 24, é integralmente dentro da *interface* do Grasshopper. As equipes devem inserir a geometria das superfícies e das curvas dos ambientes nos *inputs* do algoritmo. Nota-se que todos os ambientes contemplados pela norma devem ser analisados, como salas de estar, dormitórios, cozinhas e áreas de serviço.

Figura 24 – Definição dos Parâmetros de Simulação



Fonte: Autor (2021).

São necessárias também a definição da orientação solar do projeto, com base no levantamento cadastral, e a inserção do arquivo .epw (*Energy Plus Weather Format*) da cidade onde o projeto está inserido. O algoritmo utiliza a latitude e longitude do local do projeto para calcular as alturas solares e, conseqüentemente, os feixes de luz solar.

Como mencionado anteriormente, a definição da resolução do grid de análise e da quantidade de rebatimentos para cada feixe de luz deve ser realizada com atenção, de modo a evitar incongruências no resultado da análise e longos tempos de processamento.

Portanto, esse subprocesso determina que as equipes de design deverão ser auxiliadas pela equipe de tecnoestrutura que irá avaliar a geometria do projeto e seus ambientes internos, a configuração e a densidade do entorno próximo ao projeto e a orientação solar das fachadas.

Em suma, grande parte dos ambientes internos dos projetos da empresa atingem o desempenho mínimo, requerido pela Norma de Desempenho com 3 ou 4 rebatimentos para cada feixe de luz. Porém, dependendo da densidade do entorno ou da presença de reentrâncias na fachada do projeto, é necessário elevar esse número para 6 ou 7.

Foi constatado pela equipe de tecnoestrutura que o aumento do número de rebatimentos para além de 7 resulta em pouquíssimo acréscimo no resultado de iluminância, porém em grandes acréscimos no tempo de cálculo da análise.

A definição da densidade do grid de análise é definida de acordo com o tamanho do pavimento de análise e conforme o número de rebatimentos. Em análises iniciais, é preferível aumentar o valor do parâmetro -ar, enquanto o valor de -ab é ainda baixo. Nas análises decorrentes, quando é necessário aumentar o parâmetro -ab, o valor de -ar deve ser reduzido.

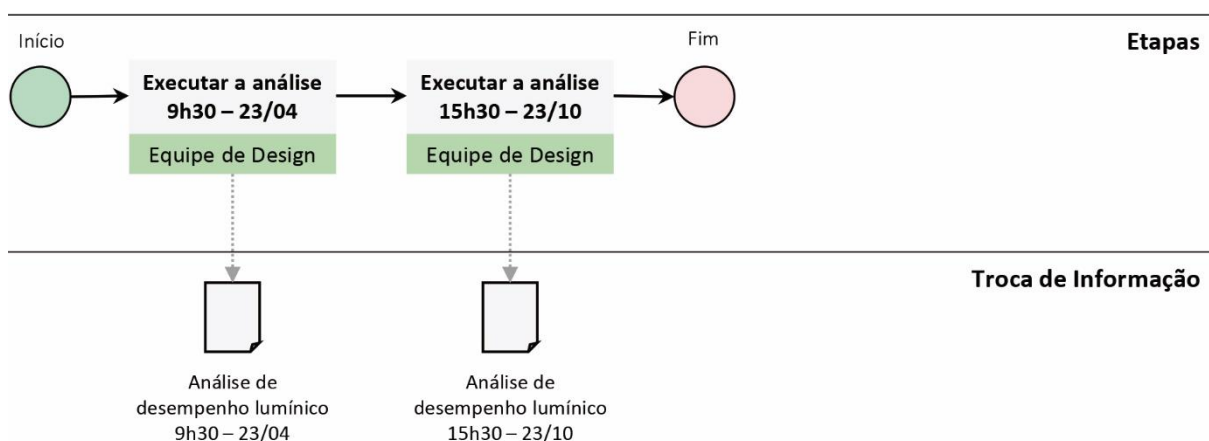
Essa estratégia previne possíveis erros no índice de iluminância medido no ambiente e reduz o tempo de processamento da análise. Foi averiguado, a partir de diversos testes com diferentes tipologias de plantas, que o índice -ar não deve ser inferior da 90, de modo a preservar a qualidade da análise.

Após a definição desses parâmetros, a equipe de design deve selecionar uma pasta para o salvamento dos resultados. O algoritmo foi configurado para registrar o resultado exibido na interface do Rhinoceros e convertê-lo em formato de imagem.

4.2.1.4 Simulação

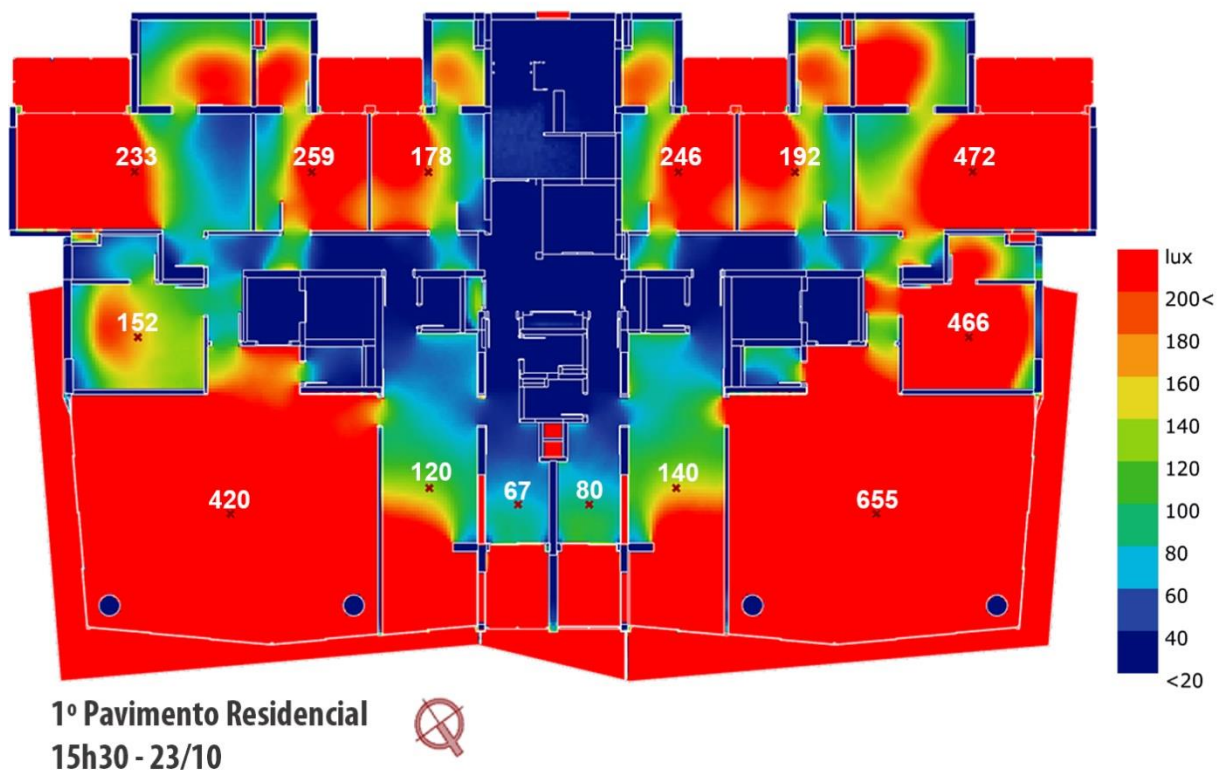
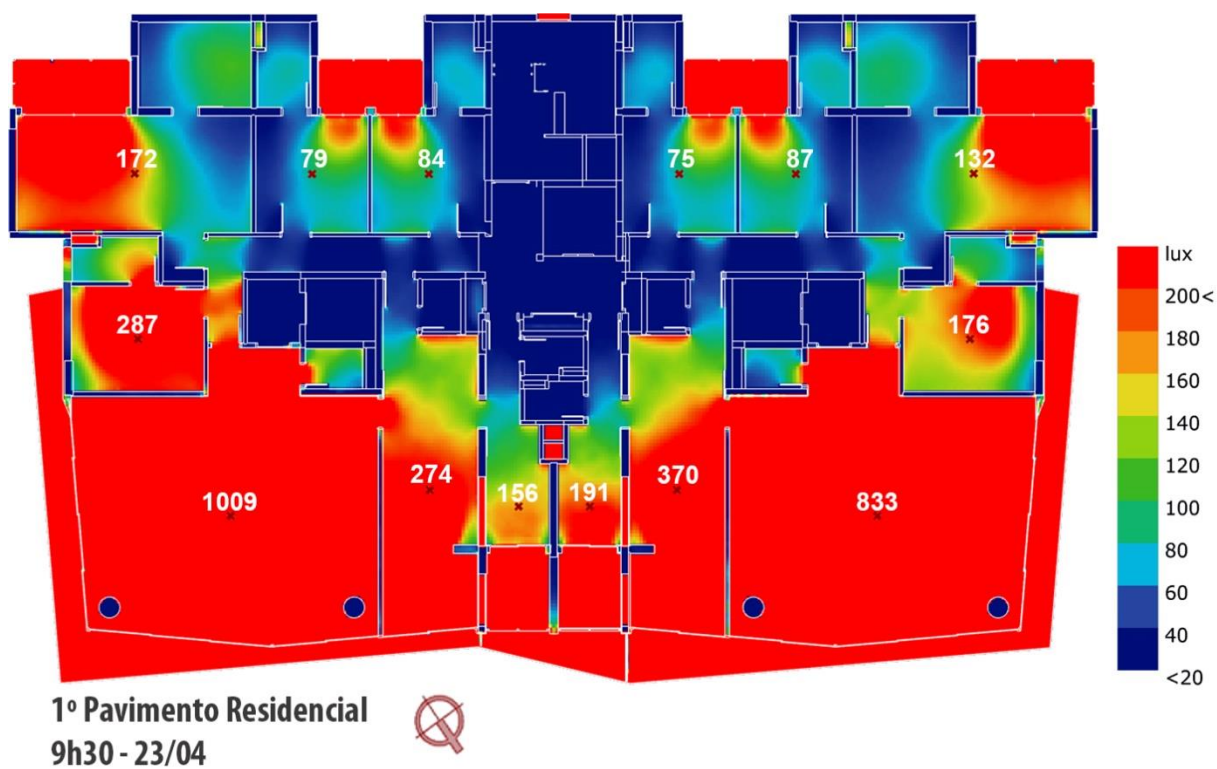
Nesse subprocesso representado pela Figura 25, as equipes deverão executar as simulações nos dois períodos estabelecidos pela ABNT (2013). O produto desse procedimento são as análises de desempenho, exibidas pela Figura 26.

Figura 25 – Simulação



Fonte: Autor (2021).

Figura 26 – Resultado das simulações de desempenho lumínico

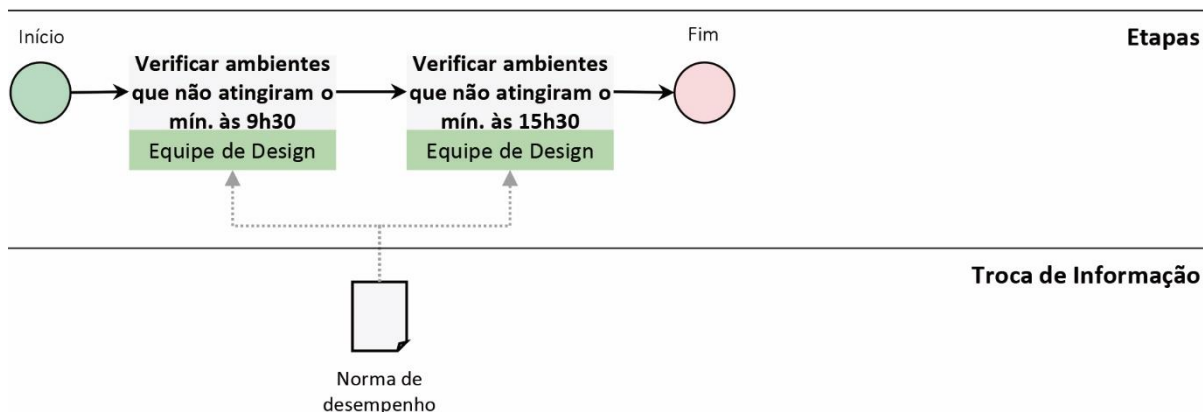


Fonte: Empresa de Arquitetura (2021b).

4.2.1.5 Análise dos Resultados

Neste subprocesso (Figura 27), as equipes deverão verificar nos dois períodos os ambientes que não atingiram o desempenho lumínico mínimo exigido pela ABNT (2013).

Figura 27 – Análise dos Resultados

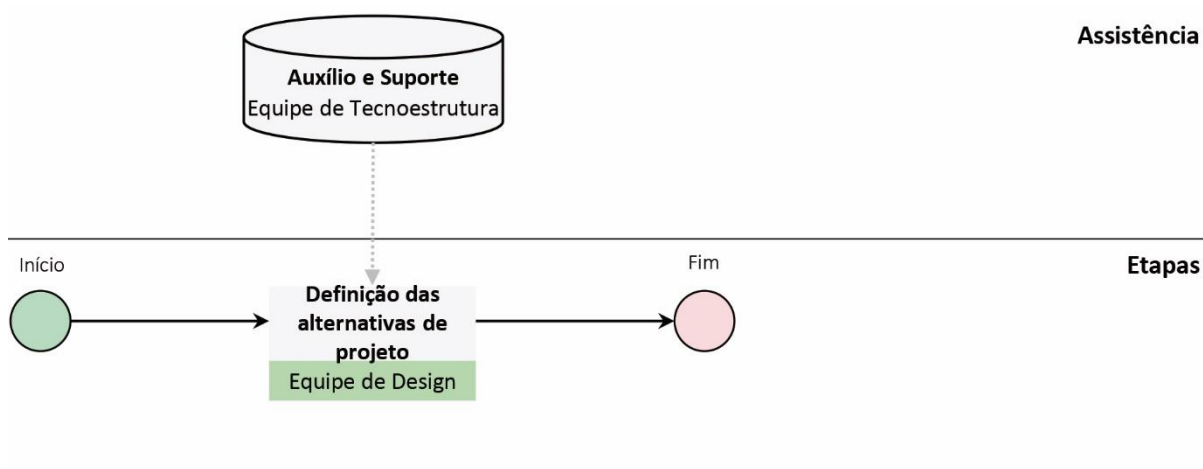


Fonte: Autor (2021).

4.2.1.6 Definição das Alternativas de Projeto

Este subprocesso (Figura 28) deve ser realizado caso algum ambiente não atinja o desempenho mínimo exigido. A tecnoestrutura irá avaliar se será necessário realizar uma nova simulação com maior precisão ou se o projeto deverá ser alterado.

Figura 28 – Definição das Alternativas de Projeto



Fonte: Autor (2021).

As alterações de projeto podem incluir: o aumento na altura ou largura dos caixilhos com a criação de bandeiras fixas na parte inferior; a remoção, onde for possível, de obstruções visuais; a alteração da geometria do ambiente com a união de um ambiente bem iluminado com outro pouco iluminado, como sala de estar e cozinha ou cozinha e A.S., de modo a facilitar a dispersão da luz.

Mudanças mais drásticas incluem modificações na geometria de todo o pavimento e na orientação da implantação, sendo que essas alterações devem sempre obedecer ao zoneamento vigente e aos recuos do terreno. Assim, grandes transformações são praticamente inexequíveis e o projeto deve ser reestudado e reelaborado.

4.3 PESSOAS

As pessoas são um elo de grande importância no processo de inserção de novas tecnologias em empresas de projeto. O sucesso da implementação passa, invariavelmente, pela capacidade dos colaboradores da empresa em executar as suas tarefas e subprocessos.

Entre as quatro categorias do método de implementação apresentado por esta pesquisa, essa é provavelmente a área que demanda os maiores esforços, pois são ainda poucos os colaboradores que já tiveram contato com ferramentas de programação visual e softwares de simulação.

As simulações de iluminação natural precisam ser entendidas pelos colaboradores da empresa como um artifício que contribui para o processo de projeto por facilitar a visualização e a compreensão do impacto das decisões de projeto sobre o nível de desempenho lumínico, e não como mais um item que aumenta a complexidade do trabalho e a quantidade de tarefas que precisam ser executadas.

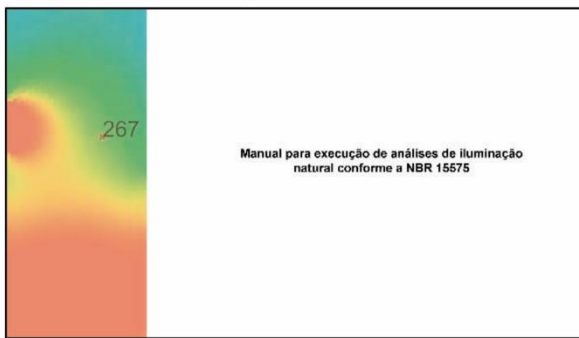
Para contornar essa questão, é importante explicar aos colaboradores os motivos que levaram a empresa a adotar essa implementação e a sua importância para a empresa e para o processo de projeto. Em seguida, é importante comunicar como será a etapa de treinamento e o apoio que os colaboradores receberão durante a implementação.

4.3.1 Documentos de Apoio

Nesta pesquisa foram desenvolvidos dois documentos que ambicionam o auxílio às pessoas durante o processo de execução das simulações de desempenho lumínico e discutem conceitos e estratégias projetuais.

O “Manual para execução de análises de iluminação natural conforme a NBR 15575” é um documento de 87 páginas que objetiva a apresentação das etapas de trabalho e os procedimentos adotados para executar as análises de desempenho lumínico. A Figura 29 exhibe a capa e o sumário deste manual.

Figura 29 – Sumário e capa do Manual para execução das análises de iluminação

Manual para execução de análises de iluminação natural conforme a NBR 15575	Capa do Manual
Objetivos e Procedimentos	
1. Softwares	
a. Instalação Ladybug e Honeybee [Legacy Plugins]	
b. Instalação Honeybee [+]	
c. Instalação do Radiance	
2. Fluxo de análise	
a. Salve o arquivo .pln	
b. Desvincule os módulos dos pavimentos	
c. Abra portas internas e venezianas de enrolar	
d. Modele o entorno	
e. Criação de novas superfícies no Archicad	
f. Salve o modelo como arquivo .obj	
g. Execute o Rhinoceros	
h. Importe do arquivo .obj para o Rhinoceros	
i. Algumas dicas de navegação no Rhinoceros	
j. Ajuste de Layers	
k. Carregue o RhinoScript	
l. Execute o RhinoScript	
m. Execute o Grasshopper	
3. Como foi montado o algoritmo	
a. Definição do grid de análise e ambientes	
b. Definição do norte, data e horário	
c. Definição dos rebatimentos e resolução	
d. Definição do arquivo .epw e pasta local	
e. Parâmetros de execução	
f. Parâmetros opcionais	

Fonte: Autor (2021).

Esse documento discorre sobre os softwares e *plug-ins* utilizados no processo e os procedimentos para a instalação dessas ferramentas nos computadores das equipes; apresenta o diagrama do processo de projeto para a execução das análises e

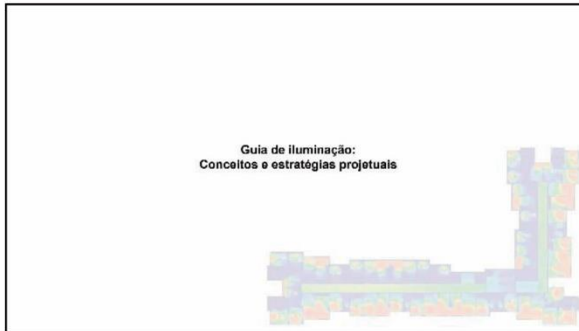
esclarece como os subprocessos e as tarefas devem ser executados; exhibe as diferentes partes do algoritmo e explica como as equipes de design devem operacionalizá-lo.

O Manual explica, com o auxílio de figuras e capturas de tela, todas as tarefas definidas pelo processo, exhibe dicas e métodos de modelagem no Rhinoceros e mostra diversas simulações de desempenho lumínico realizadas em projetos da empresa pela equipe de tecnoestrutura durante a etapa de definição dos parâmetros do algoritmo.

O “*Guia de iluminação: Conceitos e estratégias projetuais*” é um documento de 40 páginas que objetiva a revisão dos conceitos relacionados à iluminação. Eles servem como base para a elaboração das análises de desempenho e para a apresentação de estratégias projetuais que podem ser incorporadas ao projeto, de modo a otimizar o desempenho lumínico.

Esse guia, cujo sumário e capa são representados pela Figura 30, propõe uma revisão dos requisitos e métodos de avaliação preconizados pela Norma de Desempenho (ABNT, 2013); analisa conceitos relacionados à radiação global, direta, difusa e refletida; examina, por meio de figuras, gráficos e análises, o impacto das obstruções visuais nos índices de iluminância dos ambientes, como a presença de taludes, muros de arrimo e empenas, e a influência da geometria do projeto nos níveis de desempenho.

Figura 30 – Sumário e capa do Guia de iluminação

Guia de iluminação: Conceitos e estratégias projetuais	Capa do Guia
Objetivos e Procedimentos	
1. Revisão da NBR 15575-1, seção 13.2.2	
2. Radiação Global	
a. Tipos de Radiação	
b. Impacto do entorno no desempenho lumínico	
c. Impacto das obstruções visuais	
3. Reflexão da Luz	
a. Comparativo entre ambientes	
4. Como interpretar os resultados da análise	
a. Aplicação em projeto	
5. Como proceder quando o desempenho do ambiente não atinge o mínimo exigido	
6. Fluxo de decisão	
a. Aplicação do fluxo de análise	

Fonte: Autor (2021).

O Guia esclarece também como as equipes devem interpretar os resultados das análises e exibe algumas estratégias projetuais que podem ser adotadas quando os ambientes internos do projeto não atingem o desempenho mínimo.

4.3.2 Apresentações do Método de Implementação e do Material de Apoio

A apresentação do método de implementação e dos documentos de apoio para os colaboradores da empresa aconteceu em três ocasiões: i) em outubro de 2020, para os líderes de projeto; ii) em novembro de 2020, para os colaboradores de uma equipe de projeto com o intuito que esses pudessem testar e avaliar o método de implementação; e iii) em dezembro de 2020, para os demais colaboradores do escritório.

4.3.2.1 Apresentação aos Líderes de Projeto

A primeira reunião foi organizada pela Gerente Técnica da empresa, com o objetivo de apresentar o processo de implementação desenvolvido aos Líderes de Projeto, tanto da Gerência de Design, quanto da Técnica. Esse encontro também serviu para esclarecimento de dúvidas, análise das expectativas e alinhamento das expectativas dos líderes de projeto.

Nessa reunião, a Gerente Técnica expressou a importância destas análises para o escritório, para a qualidade dos projetos e para a redução de riscos envolvendo o não atendimento às normas de desempenho.

O BIM *Manager* e o autor desta pesquisa apresentaram o material de apoio, tiraram dúvidas sobre o processo de execução das análises e sobre a interoperabilidade entre softwares e esclareceram como seria o apoio dado às equipes de projeto.

Os líderes demonstraram grande apoio à inserção das simulações no processo de projeto da empresa, porém expressaram preocupações com relação ao cronograma dos projetos. Foi comentado que essa nova atribuição ocasionaria em mais horas de trabalho para as equipes e, portanto, ocasionaria em atrasos na entrega dos projetos.

Foi esclarecido às equipes que a implementação das simulações de desempenho lumínico nas fases iniciais do projeto visa à redução do número de revisões de projeto

nas etapas de desenvolvimento. Conseqüentemente, deve reduzir o retrabalho decorrente do não atendimento às normas de desempenho e, portanto, deve beneficiar às equipes e facilitar a execução do cronograma.

Foi salientado que a operacionalização de novas ferramentas evidencia diversos desafios e dificuldades iniciais. Os primeiros meses de implementação poderão ser, de fato, mais desafiadores; porém, com o passar do tempo, os colaboradores devem desenvolver a destreza necessária para executar o método proposto.

Ressaltou-se que, certamente, os estágios iniciais do aprendizado de um novo conhecimento são os que demandam maior tempo de estudo e dedicação. Portanto, a assessoria da equipe de tecnoestrutura será fundamental para assegurar a qualidade das simulações, solucionar dúvidas e auxiliar as equipes de design.

Por fim, foi expresso que essa é a primeira de várias iniciativas que estão em desenvolvimento na empresa com o intuito de aumentar a qualidade dos projetos e reduzir o retrabalho.

4.3.2.2 Apresentação à primeira equipe de projeto

Em novembro de 2020, a tecnoestrutura apresentou o algoritmo, o processo e o material de apoio aos colaboradores de uma equipe de projeto. A escolha da equipe foi motivada pela complexidade do projeto em desenvolvimento, um empreendimento residencial de duas torres localizado na cidade de São Paulo, onde a distância entre as torres, as cores das fachadas e a geometria do pavimento exerciam forte influência sobre o desempenho lumínico dos ambientes. Por tratar-se de um empreendimento voltado ao mercado popular, havia algumas restrições com relação ao tamanho dos caixilhos, ao sistema construtivo adotado (alvenaria estrutural) e à quantidade de unidades projetadas.

O projeto já havia sido analisado por um consultor externo que constatou a influência das decisões de projeto supracitadas no desempenho lumínico de alguns ambientes. Desse modo, foram sugeridas a essa equipe a criação de algumas alternativas de projeto e a subsequente simulação destas opções, com o auxílio do algoritmo desenvolvido.

Com a manipulação da geometria do modelo do Archicad, a equipe criou um conjunto de alternativas de projeto. Foram propostas variações no perímetro dos pavimentos, no tamanho dos caixilhos e nas cores das fachadas. Posteriormente, a equipe utilizou o método desenvolvido por esta pesquisa para exportar, individualmente, as opções de projeto para o Rhinoceros e em seguida verificar o desempenho lumínico em cada alternativa. A partir dessa experiência, os integrantes da equipe avaliaram a complexidade do método desenvolvido, identificaram as possíveis adversidades e propuseram melhorias.

De acordo com a arquiteta líder dessa equipe, a operacionalização do algoritmo facilitou a apreciação das diversas alternativas de projeto sob a ótica do desempenho lumínico, possibilitou o entendimento de como cada variável de projeto - como as cores das fachadas, tamanho dos caixilhos e distância entre torres - afeta a iluminância dos ambientes internos e proporcionou a apresentação das melhores soluções de projeto ao cliente (LÍDER DE PROJETO, 2021).¹⁸

O relato de experiências produzido pelo arquiteto da equipe que executou as simulações de desempenho contempla uma visão geral do algoritmo e uma série de observações sobre o material de apoio, a usabilidade do algoritmo, a interpretação dos resultados das análises e a retroalimentação do processo (COLABORADOR DA EMPRESA, 2021).¹⁹

O arquiteto relata que a implementação desenvolvida por esta pesquisa facilitou a interoperabilidade entre softwares, pois permitiu que a geometria modelada no Archicad fosse utilizada para o processamento da simulação de desempenho lumínico sem a necessidade de remodelar o projeto, economizando tempo.

Sobre os documentos de apoio, o colaborador expressou que o material produzido descreve de forma clara o processo de execução das análises de desempenho lumínico e que as suas ilustrações favorecem a execução das suas variadas etapas. Para esse colaborador, o manual favoreceu a instalação dos softwares e *plug-ins* utilizados, elucidou os conceitos relativos à iluminação natural, favoreceu a manipulação do algoritmo do Grasshopper e facilitou a execução das análises de desempenho lumínico.

¹⁸ Relato disponível no Apêndice B.

¹⁹ Relato disponível no Apêndice C.

O colaborador salientou que a definição dos parâmetros do algoritmo demanda certa sensibilidade e destreza, porém o auxílio da equipe de tecnoestrutura e a consulta do material de apoio foram fundamentais para a configuração do algoritmo e para a determinação das alternativas de projeto, além de proporcionar um grande embasamento teórico sobre desempenho lumínico.

Sobre a usabilidade do algoritmo, o colaborador esclareceu que:

O Grasshopper possui uma lógica completamente diferente dos outros programas de modelagem podendo tornar-se impeditivo para usuários novos. No entanto, a maneira como o algoritmo foi montado contorna esse obstáculo. Mesmo alguém com pouca ou nenhuma familiaridade pode manipular facilmente o algoritmo, de forma semelhante a usar uma planilha de Excel, onde basta inserir os dados de entrada. O passo-a-passo está bem descrito e focado nos horários para a análise da norma. Também estão devidamente detalhados os pormenores de onde salvar os arquivos corretamente, configurações de arquivos e afins (COLABORADOR DA EMPRESA, 2021, p.2).

Alguns pontos de melhoria, destacados pelo arquiteto fazem referência aos dois parâmetros do Radiance que são definidos pelas equipes de projeto, o -ab e o -ar. No algoritmo, o usuário deve alterar o valor desses parâmetros por meio de *sliders*, componentes que definem uma variável numérica a partir de um limite mínimo e máximo, e em seguida conferir em um painel, localizado ao lado do *slider*, o valor da variável. De acordo com o colaborador, o documento de apoio deveria exemplificar de forma mais clara a relação entre o *slider* e o painel de exibição dos resultados.

Outro ponto de melhoria apontado pelo colaborador é o alto tempo de processamento da análise. De fato, o tempo de simulação pode ultrapassar 30 min em análises mais detalhadas, o que ocorre pelo alto nível de detalhamento da geometria importada do Archicad. As paredes, lajes, vigas e pilares provindos do software BIM são elementos tridimensionais que demandam maiores intervalos de processamento. Para contornar esse problema seria necessário o desenvolvimento de um modelo analítico em que esses elementos tridimensionais são substituídos por superfícies de análise.

A criação de um modelo analítico diminuiria o tempo de processamento da análise, porém demandaria a remodelagem do projeto, promovendo retrabalhos desnecessários e dificultando a implementação das simulações de desempenho no processo de projeto da empresa, de modo que todos os elementos do projeto devem

ser modelados no Rhinoceros, software ainda pouco compreendido pelos colaboradores da empresa de projetos.

Ressalta-se que a execução da análise de iluminação natural por meio do algoritmo do Grasshopper não compromete o desempenho do computador. Assim, é possível executar outras tarefas enquanto a simulação é processada. Ao mesmo tempo, existem algumas possíveis soluções para a otimização do tempo de computação das análises, que serão apresentadas no Capítulo 5 – Discussão.

4.3.2.3 Apresentação aos demais colaboradores

Quinzenalmente, a cúpula estratégica organiza uma reunião com todos os colaboradores da empresa que objetiva a exposição de assuntos organizacionais, a apresentação de novos colaboradores e a exposição de novos projetos. A explanação do método de implementação aos demais colaboradores da empresa aconteceu em uma destas reuniões.

Nesse encontro, o CEO comentou que as simulações de desempenho lumínico fazem parte do planejamento estratégico da empresa e estão diretamente vinculadas à visão da empresa, em que se almeja a criação de espaços que contribuam para a melhoria na qualidade de vida de seus usuários onde se relacionem, harmoniosamente, com o contexto urbano.

O BIM *Manager* expressou sobre a importância da avaliação de desempenho lumínico nas fases de concepção do projeto e comentou que o método proposto contribuirá para a criação de soluções ambientalmente responsivas para o projeto e poderá facilitar a definição do partido arquitetônico.

O autor desta pesquisa comentou sobre o desenvolvimento do algoritmo e os testes realizados e apresentou os dois documentos de apoio. Após essa exposição, os colaboradores da equipe de projeto, que haviam executado as primeiras simulações integradas ao processo de projeto, relataram as suas experiências e visões durante a operacionalização do algoritmo e na execução das simulações.

Nessa mesma reunião, um dos Gerentes de Projeto expressou que a empresa já havia enfrentado algumas dificuldades no passado. Foi relatado que a descoberta de problemas de desempenho lumínico nas fases avançadas do desenvolvimento do

projeto gerou grandes retrabalhos, e como a equipe de projeto não possuía o conhecimento adequado para a realização das análises de desempenho, a empresa ficou dependente das simulações dos consultores externos. Essa dependência dificultou a proposição de um conjunto amplo de alternativas de projeto e as subsequentes análises de desempenho.

4.4 GESTÃO

A análise da implementação sob o ponto de vista da gestão objetiva a investigação dos resultados obtidos. É verificado se o processo de implementação melhorou a qualidade dos ambientes do projeto e se produziu valor agregado. Essa avaliação pode ser executada do ponto de vista da gestão e produção de projetos (*Design Management*) ou da gestão de empreendimentos (*Project Management*).

Na empresa analisada por esta pesquisa, a qualidade do projeto (*Design*) é verificada pelos integrantes da equipe de tecnoestrutura e pelos Gerentes de Projeto. Nessa verificação, os colaboradores da tecnoestrutura atestam se as simulações realizadas pelas equipes de design atenderam os requisitos de desempenho exigidos pela ABNT (2013), avaliam se os parâmetros de simulação do Radiance foram usados de forma correta e se a imagem gerada não apresenta erros de processamento e, por fim, se o resultado está condizente com as condições de entorno e orientação solar. Os Gerentes de Projeto avaliam a espacialidade dos ambientes do projeto e o rendimento e a produtividade das equipes de design por meio de ferramentas de gerenciamento de projetos e de horas trabalhadas.

Na avaliação da qualidade sob a ótica do empreendimento (*Project*), a cúpula estratégica da empresa verifica se as partes interessadas estão satisfeitas, se o projeto aumentou a percepção de valor pelos *stakeholders*, produziu vantagem competitiva, reduziu os riscos associados ao não cumprimento das normas de desempenho e se reduziu a dependência de consultores externos.

Por escrito, dois gerentes de projeto da empresa expressaram as suas opiniões sobre as vantagens do uso da simulação de desempenho lumínico no processo de projeto

sob a ótica da qualidade do design e qualidade do empreendimento (GERENTES DE PROJETO, 2021).²⁰

Na visão do Gerente de Projeto A, o processo de concepção de projetos deve analisar as determinantes de conforto impostas pelas condições climáticas do local de implantação, de modo a determinar as restrições e diretrizes de projeto e, conseqüentemente, definir o partido arquitetônico do edifício.

Para esse gerente, as simulações facilitaram o entendimento do contexto em que a edificação está inserida, promoveram o entendimento e a visualização de dados importantes, contribuíram para o processo de conceituação dos projetos e resultaram no aumento da qualidade dos espaços projetados e no conforto de seus usuários.

Foi observado por esse gerente que as simulações desempenham um papel fundamental durante a concepção de projetos de edificações. As análises desenvolvidas geram uma grande quantidade de dados e informações sobre desempenho, que servem como base para o desenvolvimento dos demais projetos do empreendimento e, conseqüentemente, favorecem a consonância entre os projetos e disciplinas, aumentam a qualidade do empreendimento e ampliam a percepção de valor dos usuários, projetistas e clientes.

O relato do Gerente de Projetos B afirma que as simulações de desempenho lumínico ampliaram a compreensão dos requisitos da Norma de Desempenho pelos colaboradores da empresa; salienta sobre a importância da execução das análises de desempenho nas fases preliminares do desenvolvimento do projeto, onde as alterações e adaptações são mais fáceis de serem executadas e resultam em menores retrabalhos; e destaca que a implementação das simulações no processo de projeto da empresa diminuiu a dependência dos consultores externos durante as fases iniciais do projeto, pois a própria equipe de design consegue simular diversas espacialidades para o empreendimento e apresentar ao cliente as melhores soluções de projeto.

Por fim, o gerente B pondera que, embora a simulação de desempenho lumínico proposta por esta pesquisa contribua para a melhoria da qualidade dos espaços e

²⁰ Relatos disponíveis no Apêndice A.

facilite a tomada de decisão, a empresa ainda opta pela inclusão de um consultor externo para validar os resultados obtidos.

A validação dos resultados por um consultor externo é um procedimento provisório, que serve para remover possíveis desconfiâncias com relação às análises desenvolvidas pela empresa de arquitetura, visto que a implementação das simulações de desempenho lumínico é um processo ainda recente e em fase de desenvolvimento.

Nessa validação, uma empresa especializada simula o desempenho lumínico dos ambientes do projeto e produz um parecer técnico contendo os respectivos níveis de iluminância; em seguida a equipe da tecnoestrutura compara os resultados obtidos pelo consultor especializado com a simulação produzida pela equipe de projeto.

Foi observado que a diferença entre os resultados alcançados pela análise do consultor externo e pela simulação proposta por esta pesquisa não é muito expressiva e varia conforme a quantidade de luz que adentra o ambiente. Em espaços onde o desempenho lumínico fica próximo ao limite inferior da Norma de Desempenho (60 lux), a variação entre resultados fica em torno de 10 a 15 lux; em ambientes com níveis muito altos de desempenho (> 400lux), essa diferença pode alcançar 80 lux.

As possíveis causas para esse desvio estão atreladas aos diferentes métodos de cálculo empregados pelas distintas ferramentas disponíveis no mercado, pois softwares diferentes computam os feixes de luz de maneiras distintas. Essa constatação foi observada em Iversen *et al* (2013), em que os autores examinaram os métodos de cálculo de nove softwares de análise de iluminação natural e propuseram uma série de testes com o objetivo de investigar o comportamento da luz em cinco ambientes distintos. Os resultados obtidos pelos autores apontam para uma variação nos resultados de até 20%, especialmente nos locais próximos às janelas, onde a iluminância é maior.

Ferramentas de simulação como o Relux e o Dialux, amplamente utilizadas por diversos consultores especializados, são softwares de código fechado, isto é, são programas que não permitem o acesso ao código fonte, dificultando o entendimento dos métodos de cálculo e análise adotados por essas ferramentas. Assim, simulações de desempenho lumínico geradas a partir de diferentes softwares irão, inevitavelmente, produzir resultados com pequenas divergências.

Embora a empresa ainda opte pela validação dos resultados por um consultor externo, a implementação proposta reduziu a dependência desses profissionais durante as etapas preliminares do projeto, diminuiu a quantidade de retrabalho, facilitou a análise de um conjunto de alternativas e, na opinião dos dois gerentes da empresa, aumentou a qualidade dos ambientes do projeto.

5 DISCUSSÃO

A concepção dos espaços arquitetônicos deve ser pensada a partir de conceitos de desempenho e sustentabilidade. O espaço deve garantir o conforto termofisiológico, proporcionar habitabilidade, transmitir segurança durante o uso e operação e prezar pela qualidade de vida de seus usuários.

O atendimento à Norma de Desempenho, mais que uma obrigação legal, é uma responsabilidade de arquitetos e projetistas com a qualidade de vida das pessoas que irão habitar e utilizar seus projetos. O cuidado com o desempenho da edificação parte da preocupação sobre como o comportamento dos diferentes sistemas que compõem uma edificação impacta a vida das pessoas.

Na atualidade, as tecnologias digitais possibilitam o entendimento das condições geoclimáticas do local de implantação do projeto, facilitam a interpretação de dados e a avaliação de diferentes alternativas de projeto sob a ótica do desempenho estrutural, térmico, lumínico, acústico, energético etc. e promovem a detecção antecipada de possíveis problemas futuros, antes mesmo que estes aconteçam.

A implementação de novas ferramentas e tecnologias no processo de projeto pode fomentar a criatividade dos arquitetos, auxiliar na criação de novas formas, geometrias e diferentes relações de plasticidade, facilitar a análise das diversas alternativas de projeto sob a ótica do desempenho e amparar a definição da forma arquitetônica.

Grande parte das pesquisas produzidas sobre o uso das ferramentas digitais em arquitetura analisa as mudanças no processo criativo geradas por essas tecnologias e as decorrências sobre a forma e o partido arquitetônico. Foi constatado que ainda são poucas as pesquisas que se atentam aos procedimentos necessários para a implantação de novas tecnologias no processo de projeto em arquitetura, sobretudo em uma grande empresa de projetos.

Esta pesquisa entende que a inserção de novas tecnologias no processo de projeto em arquitetura exige soluções integradas, adaptadas às características e particularidades da empresa de projetos e convergentes com suas demandas e necessidades.

Ao longo de 50 anos de história, a empresa analisada por esta pesquisa desenvolveu centenas de projetos, de variados usos e programas, e é atualmente uma das líderes no desenvolvimento de projetos imobiliários na cidade de São Paulo.

São poucos os escritórios de arquitetura de apresentam uma estrutura organizacional como a da empresa analisada. O quadro de funcionários, com mais de 100 colaboradores espalhados por nove estados brasileiros, é composto por uma gerência de gestão e pessoas, um núcleo de apoio, uma equipe de tecnoestrutura, uma gerência de design e uma gerência técnica.

O planejamento estratégico desenvolvido para o período entre 2013-2020 objetivou o aumento da competitividade e da relevância comercial da empresa e, por consequência, fomentou a implementação do BIM como tecnologia padrão para o desenvolvimento de todos os projetos da empresa.

Destaca-se que a inserção da tecnologia BIM no processo de projeto foi apenas umas das iniciativas empreendidas pela empresa para atingir seus objetivos, e não o propósito final. É fundamental que a implementação de novas tecnologias esteja acompanhada por outras iniciativas que contemplem os variados aspectos organizacionais da empresa e as características do serviço desenvolvido.

A implementação proposta por esta pesquisa está inserida no propósito social da empresa de projetar espaços visando o desempenho e o conforto ambiental, prezando pela saúde e o equilíbrio termofisiológico de seus usuários.

O uso de algoritmos no processo de projeto em arquitetura concede aos arquitetos e projetistas a capacidade de desenvolver suas próprias ferramentas de análise e concepção de projetos. Esta pesquisa entende que na era digital essa habilidade será cada vez mais importante e relevante, pois além de permitir a automação de procedimentos repetitivos e a criação de novas relações espaciais, a programação algorítmica proporciona o contorno das limitações e particularidades dos softwares desenvolvidos pelas grandes empresas de tecnologia e a análise de uma grande quantidade de dados.

Esta pesquisa entende ainda que o uso da modelagem paramétrica como auxiliadora no processo de decisão de projeto pode e deve ser ampliado. Para isso, é fundamental que mais universidades insiram esta temática na grade curricular de seus cursos de graduação em arquitetura ou que promovam cursos extracurriculares como os

idealizados por Florio (2011), Tramontano (2015) e Almeida, Lima, Borges e Souza (2017).

Também é importante que os escritórios que já empregam essa tecnologia publiquem relatos e discorram sobre as suas experiências. Foi observado que grandes empresas internacionais possuem publicações próprias, em que grande parte do processo de concepção de seus edifícios é evidenciado e analisado (PERKINS&WILL, 2021; SOM 2021 e GENSLER, 2021). Notou-se que diversos arquitetos, dessas e de outras empresas, publicam suas experiências com MP em congressos e em periódicos internacionais, como: Miller (2001), Booshan (2017) e Bernal *et al* (2020). Essa exposição sobre o processo de projeto paramétrico amplia a compreensão sobre as novas técnicas de concepção digital aplicada à produção de edifícios, instiga a curiosidade de arquitetos, estudantes e pesquisadores sobre o assunto e estimula o desenvolvimento de novas pesquisas e projetos.

O método de implementação empregado foi fundamentado a partir da associação entre tecnologia, processo, pessoas e gestão, e objetivou a redução dos riscos envolvendo o não cumprimento das normas de desempenho, a atenuação do retrabalho, a diminuição na dependência das análises realizadas por consultores externos e o aumento da qualidade ambiental do projeto. Nas próximas seções deste capítulo serão elencadas as principais vantagens e limitações do método proposto observadas por esta pesquisa.

5.1 TECNOLOGIA

No Quadro 3, são destacadas algumas vantagens e limitações das tecnologias, softwares e programas escolhidos por esta pesquisa durante o processo de implementação proposto.

Foi observado por esta pesquisa que o uso de ferramentas de programação visual (VLP), como o Grasshopper, proporcionou o desenvolvimento de algoritmos por pessoas com pouca experiência em programação. A rastreabilidade inerente aos algoritmos visuais facilitou o ajuste pontual dos parâmetros do Radiance e o refinamento do código.

Quadro 3 – Vantagens e limitações da tecnologia empregada

Vantagens	Limitações
O Grasshopper facilitou o desenvolvimento do algoritmo por pessoas com pouca experiência em programação.	A criação das alternativas de projeto é realizada no Archicad, não no Grasshopper.
O algoritmo facilitou a calibragem dos parâmetros de execução do Radiance e proporcionou a adaptação do motor de análise às necessidades da empresa e às exigências da Norma de Desempenho (ABNT, 2013).	O grande número de <i>inputs</i> no algoritmo demanda atenção às equipes de projeto
O algoritmo facilitou a predefinição de alguns ajustes de execução, como o albedo dos materiais, a configuração do céu e as definições de hora e data.	

Fonte: Autor (2021).

O Grasshopper também facilitou manipulação do algoritmo e a execução da análise de desempenho lumínico por colaboradores com pouca experiência em técnicas de simulação ou programação, pois grande parte do código já estava pré-configurada, restando às equipes a inserção dos dados inerentes ao projeto por meio de *sliders* numéricos e *inputs* pré-definidos.

A simulação digital permitiu a avaliação de uma série de alternativas para o projeto, favoreceu a visualização do comportamento dos feixes de luz natural no interior dos ambientes e colaborou para o entendimento de como as variáveis de projeto afetam o desempenho lumínico dos ambientes.

É importante que cada processo de implementação entenda as particularidades da empresa e as características de seus colaboradores. Embora a modelagem paramétrica seja um processo altamente dinâmico, que proporciona a criação de uma grande quantidade de alternativas de projeto, nesta pesquisa esse dinamismo ficou acanhado devido ao pouco conhecimento dos colaboradores da empresa em ferramentas de MP, o que impediu que com que a alternância de parâmetros de projeto fosse feita com o auxílio do Grasshopper. Porém, essa limitação não comprometeu os resultados alcançados por esta pesquisa.

Outra limitação observada é o grande número de *inputs* e entradas do algoritmo que demanda elevada atenção dos colaboradores das equipes de projeto, de modo que a configuração equivocada de algum parâmetro pode invalidar a simulação. Por esse motivo, a equipe de tecnoestrutura deve sempre assessorar as equipes na correta manipulação desses parâmetros.

5.2 PROCESSO

O processo de execução das simulações de desempenho lumínico usufruiu do grande potencial de integração das ferramentas de modelagem paramétrica com softwares de simulação e análise e com programas que usam a tecnologia BIM. Foram também benéficos para essa implementação o prévio conhecimento de todos os funcionários do núcleo operacional em modelagem com Archicad, a compreensão de parte dos arquitetos em modelagem com Rhinoceros e o apoio da alta gerência da empresa.

O Quadro 4 realça algumas vantagens e limitações. As vantagens observadas facilitaram a execução das etapas do processo pelas equipes de projeto. As limitações poderão nortear a revisão futura do processo desenvolvido.

Quadro 4 – Vantagens e limitações do processo proposto

Vantagens	Limitações
Parte das etapas do processo é realizado em softwares já conhecidos pelos colaboradores da empresa.	A simulação das alternativas de projeto demanda a criação de um novo arquivo .obj, atravancando a retroalimentação do processo.
O processo facilitou a transferência da geometria do Archicad para o Rhinoceros, sem a necessidade de remodelar o projeto (Interoperabilidade).	É necessário fazer algumas modificações no modelo, como desvincular os módulos do modelo, abrir portas e subir venezianas de enrolar, que demandam a criação de um arquivo novo.
A conversão das superfícies do Archicad em layers no Rhinoceros, facilitou a associação do albedo dos materiais aos vários elementos do modelo.	Elevado tempo de processamento da análise.

Fonte: Autor (2021).

O processo desenvolvido facilitou a troca de informação entre o Archicad, software amplamente difundido na empresa, e o Rhinoceros por meio da criação de um arquivo .obj, sem a necessidade de remodelar o projeto. Essa vantagem permitiu que grande parte das informações contidas no modelo BIM fossem aproveitadas durante a configuração do modelo de análise.

Além da geometria do edifício, o processo também facilitou a transferência das informações relativas aos materiais do projeto. As superfícies pré-configuradas pelas equipes no Archicad são utilizadas pelo algoritmo na configuração do albedo dos materiais. Desse modo, as equipes não precisam reconfigurar os materiais no Rhinoceros ou os índices de refletância no Grasshopper. Essa característica do

processo automatiza uma tarefa trabalhosa, que demanda atenção e conhecimentos prévios em iluminação e desempenho lumínico.

Esta pesquisa entende que o processo de troca de informações entre softwares por meio de um arquivo .obj apresenta algumas limitações com relação a sua retroalimentação, de modo que para cada alternativa de projeto gerada no Archicad, a equipe deve criar um novo arquivo .obj.

O uso de *plug-ins* como o Archicad Live Connection, que estabelece uma conexão direta entre o Archicad e o Grasshopper, contornaria o problema, de modo que as mudanças propostas pelos arquitetos no Archicad seriam automaticamente interpretadas pelo Rhinoceros, sem a necessidade de exportação ou criação de novos arquivos.

Porém, esta pesquisa identificou alguns aspectos deste *plug-in* que dificultariam a operacionalização do algoritmo pela equipe de design, como a necessidade de reconfiguração dos materiais do projeto, o que demandaria a inserção de mais *inputs* no algoritmo e dificultaria a execução do processo. Foi também detectado que esse *plug-in* não consegue operacionalizar grandes quantidades de dados e geometrias, de modo que a ferramenta se torna pouco estável quando associada a arquivos de Archicad (.pln) muito pesados. Em diversos testes, essa instabilidade ocasionou o fechamento repentino do Rhinoceros.

De fato, as equipes devem realizar algumas modificações no modelo do Archicad, como a abertura das portas internas das unidades e das venezianas de enrolar. Não é um procedimento muito demorado ou que demande muito esforço das equipes de design; porém, pode gerar incongruências no resultado final da simulação caso o usuário se esqueça de realizar essa etapa. Uma solução para essa limitação é a criação de um *script* em Python capaz de executar as duas tarefas supracitadas, automatizando parte do processo.

Outra limitação faz referência ao alto tempo de processamento das análises com maior nível de precisão utilizadas no final do estudo preliminar ou em pontos estratégicos do projeto.

Como discutido no Capítulo 4, o alto tempo de computação é, possivelmente, fruto do alto nível de detalhamento do modelo importado do Archicad. A criação de um modelo analítico de geometria mais simples contornaria esse problema, porém, esse

precisaria ser criado no Rhinoceros, software com baixa adesão na empresa de projetos, e demandaria a remodelagem do projeto.

Esta pesquisa sugere duas formas para contornar o problema. A primeira é por meio da instalação do Accelerad, um aplicativo desenvolvido pelo Prof. Nathaniel Jones no laboratório de sustentabilidade do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), compatível com o Radiance que altera o modo de processamento da análise pelo computador (ACCELERAD, 2021).

Por meio da instalação desse aplicativo, a simulação passa a ser processada pela unidade de processamento gráfico (GPU) do computador e não mais pela unidade central de processamento (CPU). Enquanto a CPU é responsável por uma série de tarefas como a execução do sistema operacional, execução de aplicativos e alocação de memória, a GPU é inteiramente dedicada à computação de operações gráficas como a exibição de vídeos e imagens e o processamento de modelos 3D. Essa característica da GPU de alto processamento de atividade gráfica pode diminuir, consideravelmente, o tempo de computação da análise. Contudo, para que a análise seja processada mais rapidamente por meio da GPU, é preciso que o computador conte com uma placa gráfica de alto desempenho.

No começo do trabalho remoto, em março de 2020, todos os colaboradores da empresa analisada por esta pesquisa foram autorizados a levar os computadores do escritório para as suas casas. Com o grande crescimento da empresa e a subsequente contratação de colaboradores em nove estados diferentes, a empresa está desenvolvendo uma infraestrutura de Desktop Virtual (*Virtual Desktop – VDI*), sistema que permite o acesso remoto a um sistema operacional e seus aplicativos, sem a necessidade do dispositivo físico. Com isso, todos os funcionários da empresa conseguirão trabalhar com as mesmas configurações de processamento gráfico.

A grande vantagem desse recurso é o alto nível de processamento da GPU instalada da Desktop Virtual, consideravelmente superior à maioria dos computadores pessoais. Com esse recurso pronto e com a instalação do Accelerad, seria possível executar as análises de desempenho lumínico em um tempo substancialmente menor.

Outra possível solução bem mais complexa apresentada pelo engenheiro de sistemas digitais da empresa é executar as simulações a partir do Linux, com vários núcleos de processamento. Essa alternativa esbarra em outro problema: o Rhinoceros não roda

nativamente em Linux. Deste modo, seria necessária a instalação de um Subsistema Windows para Linux (*Windows Subsystem for Linux – WSL*), um módulo que permite a execução de um ambiente Linux dentro do próprio Windows. Com esse recurso, seria possível a execução do Rhinoceros no Windows e a execução do Radiance no Linux.

Possivelmente, esse paralelismo entre os dois sistemas operacionais dificultaria a operacionalização das análises de desempenho lumínico pelas equipes de design, de forma que adicionaria um novo conjunto de tarefas ao processo de implementação.

A princípio, a solução mais adequada para o alto tempo de processamento é a execução das análises de desempenho em uma Desktop Virtual com o auxílio do aplicativo Accelerad.

5.3 PESSOAS

Um dos pontos de maior importância, para qualquer processo que altere a forma como os empregados de uma empresa trabalham é a comunicação entre os responsáveis pela mudança e os colaboradores que executarão o serviço proposto. A falta de diálogo entre esses dois agentes pode afetar as percepções, expectativas e perspectivas dos funcionários da empresa e, conseqüentemente, comprometer todo o método de implementação.

Na pesquisa apresentada, a alta gerência marcou diversas reuniões com os líderes das equipes de design, que objetivaram o esclarecimento do processo de implementação e o entendimento das preocupações dos colaboradores da empresa com o método proposto.

A maior apreensão dos funcionários ouvidos foi com o aumento do escopo de trabalho das equipes de projeto. Assim, a alta gerência da empresa propôs as seguintes soluções: a ampliação do quadro de funcionários das equipes de design, a criação de uma equipe dentro da gerência de design responsável pela execução de imagens renderizadas e a criação de uma equipe encarregada de produzir os estudos de viabilidade econômica.

Desse modo, parte do escopo dos colaboradores de design seria destinada a essas duas novas equipes. Também foi proposta a implantação gradual do método de

implementação apresentado por esta pesquisa, de modo que o autor desta pesquisa também executa parte das simulações de desempenho lumínico. As mudanças supracitadas foram incorporadas no planejamento estratégico da empresa para o ano de 2025, apresentado no mês de março de 2021, enquanto esta pesquisa estava sendo redigida.

Como mencionado anteriormente, o processo de implementação de novas tecnologias em uma organização deve ser elaborado de acordo com as competências dos colaboradores da empresa; conseqüentemente, o sucesso da implantação dependerá da habilidade das pessoas em executar o processo.

O grande desafio desta pesquisa foi transformar uma tecnologia nova, ainda desconhecida na empresa, em um processo de fácil entendimento e execução pelo seu núcleo operacional. Dessa forma, para facilitar a operacionalização, o algoritmo foi desenvolvido como um *template*, um arquivo padrão onde o motor de análise e as configurações que demandam maiores conhecimentos em programação visual e desempenho lumínico estavam pré-configuradas e disponíveis para o uso dos arquitetos da equipe de design.

Essa característica do algoritmo desenvolvido promoveu as vantagens observadas no Quadro 5 e foi fundamental para o sucesso da implementação proposta, pois contornou a lógica computacional do Grasshopper e a converteu em um padrão de fácil manuseio, que pôde ser adaptado às necessidades do projeto e da empresa.

Quadro 5 – Vantagens e limitações do processo executado pelas pessoas

Vantagens	Limitações
Processo de fácil execução, adaptado às necessidades e ao padrão de modelagem da empresa.	O processo demanda a instalação de vários <i>plug-ins</i> no computador do usuário (uma única vez).
Facilitou a interpretação dos resultados pelas equipes de projeto e permitiu o entendimento das condições de iluminação natural nos ambientes.	A retroalimentação do processo demanda novas alterações do projeto no Archicad, dilatando o tempo necessário para concluir o processo.
Facilitou a busca pela melhor alternativa de projeto, baseada em dados de desempenho lumínico.	

Fonte: Autor (2021).

Outro ponto que facilitou a execução do processo pelas equipes de projeto foi a criação do material de apoio. O “*Manual para execução de análises de iluminação natural conforme a NBR 15575*” descreveu de forma clara o processo por meio de

textos, imagens explicativas e capturas de tela, enquanto o “*Guia de iluminação: Conceitos e estratégias projetuais*” explicitou por meio de uma linguagem acessível acerca dos diversos conceitos sobre desempenho e iluminação natural e a influência das condicionantes de projeto e entorno no desempenho lumínico.

Os resultados produzidos pela simulação são claros e de fácil interpretação. O algoritmo exibe o desempenho lumínico alcançado no centro do ambiente e representa, no plano de análise, uma escala cromática que mimetiza o percurso da luz nos ambientes do projeto. Esse aspecto facilitou o entendimento das condicionantes do projeto e seu impacto no desempenho lumínico natural e favoreceu a busca pela melhor alternativa de projeto.

As limitações observadas fazem alusão ao tempo despendido pelas equipes para concluir o processo proposto. A instalação dos diversos *plug-ins* do Grasshopper é um tanto morosa e demanda um pouco de tempo; porém, essa é uma etapa que deve ser executada apenas uma vez no computador do usuário e que está clarificada no material de apoio.

O segundo ponto diz respeito ao tempo gasto na retroalimentação do processo. Quando um ambiente não atinge o desempenho mínimo estabelecido pela NBR 15575, a equipe deve realizar as modificações necessárias no Archicad, gerar um novo arquivo .obj, importar este arquivo para o Rhinoceros e, por fim, executar novamente a simulação.

O processo de retroalimentação de fato tende a ser um pouco truncado, pois a geometria do projeto é desenvolvida no Archicad, mas a simulação é realizada pelo Rhinoceros e seu *plug-in* Grasshopper. Essa característica, embora aumente um pouco o tempo de execução do processo, contornou a ausência de uma ferramenta de análise de desempenho lumínico para o Archicad e a falta de conhecimento dos colaboradores da empresa em Rhinoceros.

Espera-se que, com a diminuição do tempo de processamento da análise discutida na seção anterior deste capítulo, o tempo total despendido para a conclusão do processo diminua consideravelmente.

5.4 GESTÃO

A etapa final do método proposto por esta pesquisa é a análise sob a ótica da gestão. Essa fase serviu para validar a implementação e para averiguar os resultados e os benefícios do método apresentado. Esses resultados foram examinados tanto pelo ponto de vista da gestão da produção de projetos (*Design Management*), quanto da gestão de empreendimentos (*Project Management*). O Quadro 6 elenca algumas vantagens e limitações da implementação proposta.

Quadro 6 – Vantagens e limitações da implementação proposta

Vantagens	Limitações
Promoveram o entendimento das condicionantes de projeto e de entorno e facilitaram a visualização de dados.	Por ser uma implementação recente, realizada a partir de uma tecnologia nova, as análises internas ainda são validadas por consultores externos.
Facilitou a busca pelas melhores soluções de projeto, a partir de dados de desempenho.	
Facilitou a realização de análises preliminares nos momentos iniciais do projeto, nas quais os ajustes demandam menos retrabalhos.	
Permitiu a antecipação de possíveis dificuldades com relação ao não atendimento à NBR 15575, reduzindo riscos.	
Reduziu a dependência das análises dos consultores externos nas etapas preliminares do projeto.	
Aumentou a percepção de valor dos <i>stakeholders</i> do projeto e produziu vantagem competitiva.	

Fonte: Autor (2021).

As análises de desempenho lumínico podem ser interpretadas como uma poderosa ferramenta de visualização e interpretação de dados bioclimáticos, capaz de demonstrar o impacto das condicionantes do projeto arquitetônico, no desempenho lumínico de seus ambientes.

O entendimento do impacto destas condicionantes sobre o desempenho lumínico facilitou o processo de concepção dos espaços internos do projeto pelas equipes de design, de modo que a busca pela melhor alternativa de projeto foi fundamentada por dados de desempenho. Consequentemente, foi possível projetar espaços com maior conforto lumínico, promovendo assim o bem-estar dos usuários do projeto.

A inserção das análises de desempenho lumínico nas fases preliminares do projeto, além de remediar possíveis problemas relativos ao não atendimento à NBR 15575, contornaram também um problema até então recorrente na empresa, o retrabalho excessivo nas fases posteriores de projeto devido a problemas de desempenho. É notório que o tempo despendido para alterar o projeto nas fases mais avançadas é demasiadamente maior quando comparado a mudanças realizadas nas etapas iniciais.

As simulações de desempenho lumínico, quando eram executadas pelo *BIM Manager*, possuíam caráter corretivo. Com a inclusão dessas análises no escopo de trabalho das equipes de Design, essas simulações se tornaram um instrumento de concepção de projetos alinhado com o planejamento estratégico da empresa e a sua visão de projetar espaços que contribuam para a melhoria na qualidade de vida de seus usuários e de projetar edifícios que se relacionem, harmoniosamente, com o contexto urbano.

Por ter se tornado uma ferramenta de projeto integrada ao processo de concepção de edifícios, as simulações têm favorecido a compreensão dos colaboradores da empresa sobre desempenho lumínico. Foi observado um considerável aumento na preocupação dos colaboradores sobre o tema, de modo que esse assunto é recorrentemente discutido nas reuniões de projeto.

Conseqüentemente, a implementação proposta, associada a um aumento na preocupação dos colaboradores da empresa sobre desempenho lumínico, conseguiu reduzir a dependência dos consultores externos durante as etapas de desenvolvimento do projeto.

Em reuniões de projeto com os clientes da empresa, foi observado por esses que são ainda poucos os escritórios de arquitetura que incorporam simulações de desempenho em seu método de projeto. Foi apontado por alguns clientes da empresa que essa particularidade facilita o desenvolvimento do produto imobiliário, pois os próprios projetistas de arquitetura podem apontar algumas diretrizes de produto e projeto, sem a necessidade de contratação de um consultor externo.

Com a incorporação das análises de desempenho lumínico no processo de projeto, a empresa se destaca entre as suas concorrentes. A implementação proposta produziu

vantagem competitiva, aumentando a percepção de valor de seus clientes e das partes interessadas.

A implementação apresentada incorporou uma tecnologia ainda nova, por meio de um processo adaptável às necessidades da empresa, com o objetivo de sanar possíveis deficiências em seu processo de projeto. Certamente, os resultados alcançados por esta pesquisa foram obtidos devido à correta adequação da tecnologia proposta aos objetivos da implementação, à transmutação da tecnologia em um processo claro e à correta operacionalização desse processo pelos colaboradores da empresa. Essa conjuntura de fatores foi essencial para elevar a qualidade dos projetos da empresa analisada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A nova era digital, também conhecida como quarta revolução industrial ou indústria 4.0, vem estabelecendo novas relações entre o meio físico e o digital. Conceitos como Automação, Computação em Nuvem, *Big Data* e Internet das Coisas (IoT) estão cada vez mais presentes na contemporaneidade e no cotidiano de grande parte das empresas, indústrias e seus consumidores.

Ao longo dos últimos anos, o setor da construção civil tem buscado novas tecnologias digitais como forma de automatizar seus processos, otimizar sua produtividade e melhorar a qualidade das construções.

Nesse setor, as inovações oferecidas pelas tecnologias digitais: BIM, modelagem paramétrica, fabricação digital e prototipagem rápida estão criando novos paradigmas e alterando a forma de projetar, construir e gerenciar novos empreendimentos.

O processo de projeto em arquitetura é um procedimento altamente dinâmico e sequencial de refinamentos e particularizações da forma arquitetônica. Durante a concepção do projeto, o arquiteto utiliza diversos meios de representação, como croquis, desenhos técnicos, representações tridimensionais e maquetes. Nesse contexto, as TICs auxiliam o projetista a buscar a alternativa de projeto que melhor se adeque ao programa e ao partido proposto, que mais harmonize com o seu entorno e que se adapte às questões geoclimáticas do local de implantação (VEIGA, 2016).

As possibilidades relacionadas ao emprego dessas tecnologias no setor da construção civil estão associadas a um aumento na qualidade do produto final, na produtividade e colaboração entre os diferentes agentes do projeto, na redução de erros associados à falta de compatibilização, na antecipação de possíveis incongruências e na resolução de problemas, na racionalização da construção, dentre outros.

O uso das linguagens de programação de sintaxe visual, como o Grasshopper, ou textual, como o Python, quando associado ao processo de projeto de arquitetura proporcionam uma mudança no *modus operandi* de arquitetos e projetistas, de modo a estabelecerem uma série de novas possibilidades ao processo de projeto e concederem aos arquitetos a capacidade de desenvolver suas próprias ferramentas,

diminuir ou eliminar trabalhos repetitivos, automatizar processos, visualizar dados e simular diversas alternativas de projeto.

Nesta pesquisa, o Grasshopper facilitou a criação de uma nova ferramenta de análise, visualização e interpretação de dados ambientais que proporcionou a criação de um arquivo padrão. Esse arquivo pôde ser, facilmente, operacionalizado pelas equipes de projeto, promovendo a alteração do processo de projeto da empresa e facilitando a tomada de decisão na empresa analisada, de modo que retirou do BIM *Manager* a responsabilidade de executar as simulações de desempenho lumínico.

Na contemporaneidade, as análises de dados ambientais exercem um papel cada vez mais relevante no processo de projeto em arquitetura. Porém, embora os softwares de simulação tenham evoluído muito, a inserção de dados e a interpretação dos resultados vêm do arquiteto ou do projetista com conhecimentos prévios em desempenho, sustentabilidade e, possivelmente, programação de dados.

As TICs potencializam o conhecimento dos projetistas, amplificam a capacidade dos projetistas em conceber seus projetos e facilitam o processo de refinamento e decisão do projeto. Porém, um bom projeto não é alcançado, apenas, pela utilização de um software ou uma tecnologia; a qualidade do projeto está diretamente relacionada aos conhecimentos técnicos e teóricos de todos os seus agentes.

A capacitação e o treinamento dos profissionais do setor da AECO são cada vez mais importantes no âmbito da nova era digital. A quarta revolução industrial exige desses profissionais o desenvolvimento de novas habilidades e conhecimentos, muitos dos quais não são adquiridos durante a graduação em arquitetura ou engenharia. Esta pesquisa compreende que esses profissionais devem buscar novas qualificações em análise de dados, programação, realidade aumentada, simulação, fabricação digital, coordenação e gestão de projetos. É importante também que as empresas projetistas invistam na capacitação e no treinamento de seus colaboradores, de modo que o setor nacional da construção civil adentre a era da Indústria 4.0.

6.1 CONTRATEMPOS DURANTE A IMPLEMENTAÇÃO

O autor desta monografia foi o responsável pela implementação e treinamento dos colaboradores da empresa que executaram as simulações de desempenho lumínico.

Infelizmente, alguns contratempos de cunho técnico-operacional tornaram o processo de implementação dessas simulações nas equipes de design, um pouco mais prolongado do que o estipulado, anteriormente, por esta pesquisa. Ao mesmo tempo, uma mudança na estrutura organizacional da empresa alterou parte do processo planejado, embora não tenha comprometido a implementação proposta.

6.1.1 Adversidades Técnicas e Operacionais

Até meados de dezembro de 2020 a empresa possuía apenas uma única licença de Rhinoceros 5. Antes desta pesquisa ser iniciada, essa licença era usada por alguns membros das equipes de design para modelar o entorno do terreno do projeto, como descrito no item 4.1 desta monografia. Essa única licença foi também utilizada, a partir de julho de 2020, durante todo o processo de idealização e configuração do algoritmo retratado no item 4.1.1 desta monografia e também na implementação do processo proposto na primeira equipe de design, descrito no item 4.3.2.2 desta pesquisa.

Para facilitar o processo de implementação, em janeiro de 2021 a empresa adquiriu mais uma licença. Como nessa época a versão 5 do Rhinoceros não era mais comercializada pela fabricante McNeel, a empresa adquiriu uma nova licença da versão 6 do programa.

Na versão 5 do Rhinoceros, o Grasshopper era apenas um *plug-in*, ou seja, um módulo de extensão capaz de adicionar novas funções a um programa, de modo que a versão então disponível (0.9.0076)²¹ deveria ser instalada à parte, por meio de um *download* gratuito, no site da McNeel.

Uma das grandes novidades oferecidas pela versão 6 do Rhinoceros foi a incorporação do Grasshopper em sua API²². Isto é, o Grasshopper se tornou parte integrante do Rhinoceros, uma ferramenta embutida e disponível a todos os usuários, de modo que novos *downloads* não eram mais necessários.

²¹ Essa versão é considerada uma versão *WIP (Work In Progress)*. Um programa recebe essa classificação quando alguns recursos ainda precisam ser aprimorados, porém, diferentemente das versões Beta, a versão *WIP* é mais estável e possui menos, ou nenhum problema de processamento. Geralmente, quando a versão do programa é inferior à 1.0, trata-se de uma versão *WIP*.

²² *Application Programming Interface*, ou Interface de Programação de Aplicações. O conjunto de rotinas, funções e processos, utilizados por um software para se comunicar com outros programas ou com o usuário.

A versão do Grasshopper disponível no Rhinoceros 6 também mudou. Essa nova atualização (1.0.0007) corrigiu diversos erros e *bugs* e introduziu novos parâmetros e componentes à ferramenta. Lamentavelmente, essa atualização trouxe alguns problemas de incompatibilidade com o algoritmo desenvolvido por esta pesquisa na versão anterior do programa (0.9.0076).

Foi observado por esta pesquisa que o algoritmo, quando executado pela versão 6 do Rhinoceros, não funcionava corretamente. Notou-se que o carregamento do arquivo bioclimático (.epw) demorava vários minutos e que a definição do grid de análise pelo usuário provocava um total travamento do computador. Naquele momento, os motivos dessa incongruência eram ainda incertos, de modo que outros algoritmos desenvolvidos pelo autor desta pesquisa na versão 5 funcionam sem qualquer problema na versão 6 do Rhinoceros.

Como a equipe de tecnoestrutura não conseguiu resolver essa desconformidade, foi necessário o encaminhamento de um e-mail aos desenvolvedores do *plug-in* Ladybug no qual o autor desta pesquisa expôs o problema e indagou sobre as possíveis soluções. A resposta do desenvolvedor e um dos fundadores do Ladybug, Chris Mackey foi:

Eu recomendaria usar o Honeybee Legacy, ou o novo *plug-in* LBT. O *plug-in* Honeybee [+] está quase obsoleto neste ponto. A última versão estável do novo *plug-in* LBT (v. 1.2) não possui as receitas *point-in-time*, que você precisa, mas a versão em desenvolvimento (v. 1.3), ainda a ser lançada terá (MACKEY, 2021, tradução nossa).

É importante salientar que existem diferentes versões do *plug-in* Honeybee. A versão “*Legacy*” foi a primeira a ser disponibilizada, em 2013, e continua a ser atualizada. A versão [+], ou “plus” foi anunciada em 2017; essa versão ofereceu uma melhor integração com o Grasshopper e o Dynamo e disponibilizou novos componentes e sequências de trabalho. Foi também a primeira a permitir a integração com o Radiance, como visto em Roudsari (2017). A versão “*LBT*” foi lançada no final de 2020, com o objetivo de aprimorar a integração com outros motores de análise como o Radiance, o EnergyPlus, e o OpenStudio, e deve substituir as demais versões do *plug-in*. Como ainda está em fase de desenvolvimento, os componentes necessários para realizar simulações de desempenho lumínico não estão disponíveis, como visto em Mackey (2020).

A primeira versão do algoritmo desenvolvido por esta pesquisa possuía 19 componentes do Honeybee *plus*, que tiveram que ser substituídos pelos componentes da versão *Legacy*. Esse processo não foi automático e demandou uma revisão em grande parte do algoritmo, de modo que as entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) são diferentes entre as versões do *plug-in*.

Após a conclusão desta revisão, a equipe de tecnoestrutura executou uma série de testes com o intuito de aferir o modo de processamento do novo algoritmo e verificar se seu funcionamento é similar ao código original.

Durante os testes, a tecnoestrutura executou a análise de desempenho lumínico em projetos da empresa de arquitetura, utilizando a versão 5 do Rhinoceros e o algoritmo original e a versão 6, com o código revisado. Felizmente, não foram encontradas grandes diferenças entre as duas versões do algoritmo ou problemas de interoperabilidade com o Archicad; porém, foi observado que o tempo de processamento aumentou um pouco quando se utiliza a versão *Legacy* do *plug-in*.

Notou-se que a versão *Legacy* alterava significativamente, e de modo autônomo o valor do parâmetro *-ar* (resolução), de modo a garantir maior qualidade da imagem gerada pela ferramenta. Essa variação é exclusivamente, baseada na complexidade da geometria do Rhinoceros, de forma que arquivos constituídos por geometrias complexas, como como malhas tridimensionais (*meshes*) demandavam maiores valores para esse parâmetro.

Como o arquivo *.obj*, importado do Archicad é formado por um conjunto de malhas, de alta complexidade, o Honeybee *Legacy* alterava o valor da resolução da imagem (*-ar*) para 300. Foi verificado pela tecnoestrutura que essa mudança pouco influenciava no resultado da imagem, visto que as equipes de projeto foram orientadas a indicar valores expressivos para esse parâmetro.²³

Como o Honeybee é um *plug-in* de código aberto, escrito em linguagem Python, a equipe de tecnoestrutura conseguiu acessar seu código fonte, identificar o trecho do *script* que alterava o valor da definição da imagem e desabilitá-lo. Assegurando que o valor do parâmetro *-ar*, indicado pela equipe de design, será utilizado pelo *plug-in*

²³ O “Manual para execução de análises de iluminação natural conforme a NBR 15575” auxilia as equipes de design na definição do parâmetro *-ar*. Para grande parte das análises indica-se, para esse parâmetro, valores entre 90 e 120.

durante o processamento da análise e encurtando, consideravelmente, o tempo de computação e execução da simulação.

6.1.2 Mudança Organizacional na Empresa Analisada

Em março de 2021, enquanto o método proposto estava sendo implementado e esta pesquisa redigida, a empresa apresentou aos seus colaboradores o planejamento estratégico para o ano de 2025. Durante essa exposição, foi apresentada a nova estrutura organizacional da empresa, com mudanças nas gerências de design e técnica e nas equipes de ambientação e tecnoestrutura.

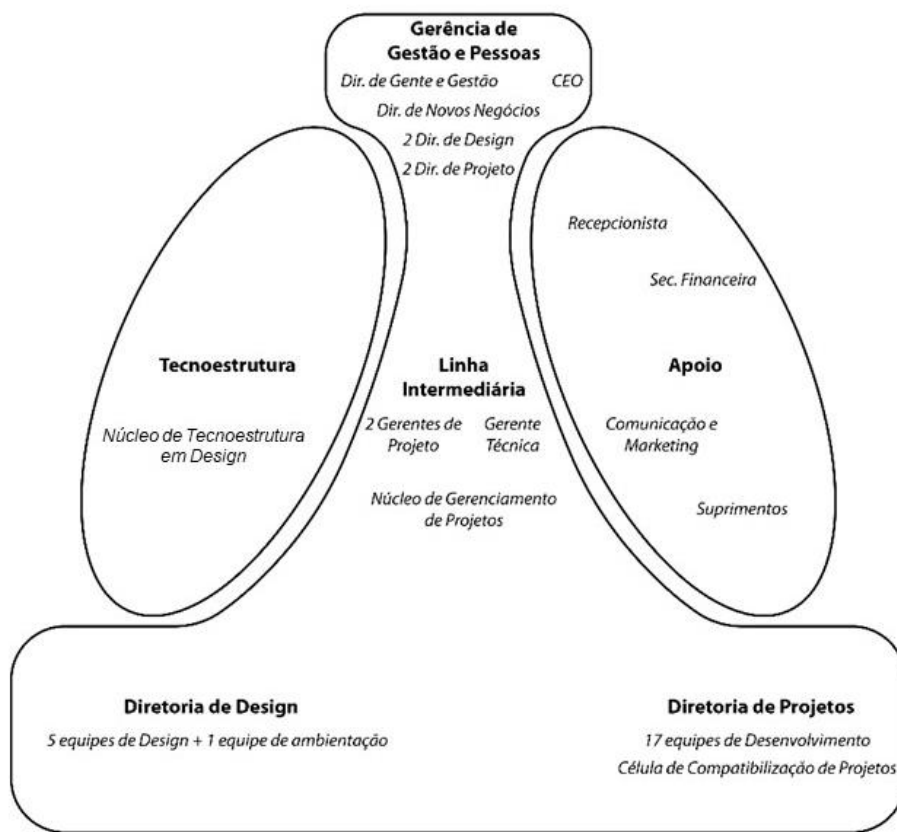
Algumas mudanças organizacionais incluem: a promoção dos gerentes de projeto a diretores associados e a subsequente criação das diretorias de projeto e de design, a promoção de alguns líderes de projeto ao cargo de gerente de projeto e a criação de um núcleo de gerenciamento de projeto, a criação de uma célula de compatibilização de projetos, e a promoção de alguns arquitetos ao cargo de líder de projeto, de modo a criar novas equipes de desenvolvimento de projetos. A mudança organizacional mais relevante para esta pesquisa foi a realocação do autor desta monografia da equipe de tecnoestrutura para a gerência de design.

O objetivo dessa mudança foi aproximar o autor desta pesquisa das etapas preliminares do projeto, de modo que esse possa auxiliar as equipes de design durante as etapas concepção e desenvolvimento por meio da criação de outras simulações, parametrizações e análises de dados.

Com essa mudança, além de auxiliar as equipes durante todo o processo de execução das simulações de desempenho lumínico, esse profissional ficou responsável pela criação de novos tipos de análise, como radiação, sombreamento e estudo de visuais, e também pela execução dessas, em conjunto com as equipes de design.

Essa reestruturação organizacional, invariavelmente, criou um núcleo de tecnoestrutura voltado à diretoria de design, como observado na Figura 31, uma vez que o autor desta pesquisa sugere melhorias no projeto a partir de dados de desempenho e propõe novas melhorias no processo de projeto dessa diretoria, e não necessariamente trabalha com a modelagem do projeto ou com o desenvolvimento de desenhos técnicos.

Figura 31 – Estrutura organizacional da empresa analisada a partir de 2021



Fonte: Autor (2021).

Essa mudança organizacional não alterou o método ou o processo de implementação apresentado por esta pesquisa nas equipes de projeto, de modo que o autor desta pesquisa ainda exercia o papel de apoio e assessoria às equipes de design. O que mudou foram o cronograma de implementação e a quantidade de profissionais capacitados para executar as simulações de desempenho lumínico.

Antes dessa mudança, imaginava-se que o autor desta pesquisa capacitaria ao menos um arquiteto ou estagiário de cada equipe de design, de forma que cada colaborador ficaria responsável pela realização das simulações de desempenho lumínico nos projetos em desenvolvimento pela sua própria equipe.

Devido à destreza do autor desta pesquisa na execução das simulações de desempenho lumínico e em virtude da grande quantidade de projetos que demandavam a verificação do nível de desempenho lumínico, a empresa estabeleceu, em um primeiro momento, que esse profissional ficaria incumbido de realizar grande parte das análises de desempenho da empresa.

Até meados de junho de 2021, todas as análises de iluminação dos projetos da empresa foram executadas pelo autor desta pesquisa e por outro colaborador da equipe de design. A partir desse mês, o autor instruiu outro arquiteto, de outra equipe, a executar as simulações de desempenho lumínico.

Foi comentado pela empresa de arquitetura que a realização de parte das análises de iluminação pelo autor desta monografia é uma circunstância provisória. E deverá ser alterada, quando a empresa contratar mais colaboradores para as equipes de design, em meados do segundo semestre de 2021.

Salienta-se que a quantidade de profissionais capacitados em operacionalizar o algoritmo e executar o processo proposto não interferiu nos objetivos iniciais pré-estabelecidos por esta monografia ou mudou o método de implementação, baseado em tecnologia, processo, pessoas e gestão, previamente apresentado.

6.2 FUTURAS REVISÕES DO PROCESSO PROPOSTO

Certamente, o processo e o algoritmo propostos por esta pesquisa passarão por revisões e atualizações, de modo a mitigar possíveis limitações, simplificar a integração com a tecnologia BIM e o software Archicad e facilitar a operacionalização do processo pelas pessoas.

O algoritmo poderá ser futuramente reescrito por meio da versão LBT do Honeybee. Foi observado em Mackey (2020) que as rotinas desenvolvidas a partir desse *plug-in* são processadas de forma mais rápida pelo computador devido a um conjunto de melhorias acrescentadas ao código fonte. Espera-se que a versão 1.3 deste *plug-in* incorpore, de fato, os componentes necessários para reformulação do algoritmo proposto por esta pesquisa.

Outra possível revisão faz referência à interoperabilidade entre os diversos softwares utilizados no processo proposto. Espera-se que as próximas versões da conexão entre o Grasshopper e o Archicad (Archicad Live Connection) sejam mais estáveis e facilitem essa permuta ou que novas ferramentas surjam, com o objetivo de facilitar a transferência de modelos sem a necessidade de produzir um arquivo .obj.

6.3 FUTURAS PESQUISAS

Para muitas pessoas a análise de dados é um conceito restrito à computação; porém, esse é um conhecimento que pode ser aplicado a diversas áreas, inclusive na AECO. Em arquitetura, a análise de dados exerce um papel cada vez mais relevante, de modo que projetos são concebidos a partir da interpretação e análise de uma grande quantidade de dados.

Qualquer projeto arquitetônico depende da interpretação de dados sobre o zoneamento, a legislação vigente e as condições climáticas do terreno e demanda informações relativas ao programa, partido arquitetônico, método construtivo, entre outros.

As diversas construções das cidades foram construídas a partir da interpretação de dados. Ao mesmo tempo, todo edifício construído gera novos dados e informações relativos ao desempenho e ao conforto de seus usuários.

Novas pesquisas podem propor a criação de um banco de dados de projetos e a subsequente análise entre os dados utilizados pelos projetistas durante a concepção do projeto e os índices de desempenho e conforto do usuário, de modo a estabelecer relações entre o partido arquitetônico, o programa funcional, a localização do edifício e o bem-estar das pessoas.

A manipulação de dados pode ser alcançada por meio de aplicativos como o Design Explorer, previamente discutido por esta pesquisa, ou pela utilização da biblioteca Pandas do Python, que permite a leitura de arquivos *.csv* (*Comma-separated values*) e pela biblioteca Seaborn, usada para análise estatística.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ACCELERAD. <https://nljones.github.io/Accelerad/> Acesso em: 20 mai. 2021.

ADDIS, B. **Edificação: 3000 anos de projeto, engenharia e construção**. Porto Alegre: Bookman, 2009. 640 p.

AISH, R. First Build your Tools. In: PETERS, B.; PETERS, T. **Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design**. Chichester: John Wiley&Sons, 2013. p. 36-49.

AISH, R.; HANNA, S. Comparative evaluation of parametric design systems for teaching design computation. **Design Studies**, v.52, 2017. p. 144-172.

AISH, R.; WOODBURY, R. Multi-level Interaction in Parametric Design. **Lectures Notes in Computer Science**, v. 3638, 2005. p.151-162

ALMEIDA, C. A. R.; LIMA, F.; BORGES, M. M.; SOUZA, F. R. Do conceito a prática digital: Uma experiência didática sobre novas linguagens para expressão de tectônicas criativas. In: XXI Congresso da Sociedade Ibero-americana de Gráfica Digital – SIGRADI, 2017, Concepción. **Anais...** p. 28-32.

ASSIS, R. M. C. **Caracterização Ótica de Materiais Transparentes e sua Relação com o Conforto Ambiental em Edificações**. 1998. 166f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5461: Iluminação**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15215-3: Iluminação natural Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-1: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) / INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **NBR ISO 21500: Orientações sobre gerenciamento de projeto**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) / INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) / INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **NBR ISO IEC 27001: Tecnologias da informação – Técnicas de segurança – Sistemas de gestão da segurança da informação – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) / INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **NBR ISO 9001: Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2015.

BERNAL, M.; MARSHALL, T.; OKHOYA, V.; CHEN, C.; HAYMAKER, J. Integrating expertise and parametric analysis for a data-driven decision-making practice. **International Journal of Architectural Computing**, v. 18, n.4, 2020. p. 424-440.

BOOSHAN, S. Parametric design thinking: A case-study of practice-embedded architectural research. **Design Studies**, v. 52, 2019. p. 115-143.

BRAHAM, W. Biotechniques: Remarks on the intensity of conditioning. *In*: KOLAREVIC B. & MALKAWI A. (Eds.). **Performative Architecture: beyond instrumentality**. New York: Spon Press, 2005. p. 57-70.

BREMBILLA, E.; HOPFE, C. J.; MARDALJEVIC, J. Influence of input reflectance values on climate-based daylight metrics using sensitivity analysis. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 11, n. 3, 2018. p. 333-349.

BROWN, N. C.; MUELLER, C. T. Design variable analysis and generation for performance-based architecture. **International Journal of Architectural Computing**, v. 17, n. 1, 2019. p. 36-52.

BURRY, M. **Scripting Cultures: Architectural design and programming**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 272 p.

CARPO, M. **The alphabet and the algorithm**. Cambridge, MA: MIT Press, 2011. 169 p.

CASTALDO, V. L.; PIGLIAUTILE, I.; ROSSO, F.; COTANA, F.; GIORGIO, F.; PISELLO, A. L. How subjective and non-physical parameters affect occupants' environmental comfort perception. **Energy and Buildings**, v. 178, 2018. p. 107-129.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para o atendimento à norma ABNT 15575:2013**. Fortaleza, 2013.

CLARKE, J. A. **Energy simulation in building design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 373 p.

CEO DA EMPRESA. **Entrevista concedida ao Autor**, São Paulo, 09 de dez. 2020.

COLABORADOR DA EMPRESA. **Relato concedido ao Autor**, São Paulo, 12 de abr. 2021.

CONSELHO DE ARQUITETURA E URBANISMO DO BRASIL (CAU/BR). **Código de ética e Disciplina do Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil**. 2015. Disponível em: https://www.caubr.gov.br/wp-content/uploads/2015/08/Etica_CAUBR_06_2015_WEB.pdf Acesso em: 18 dez. 2020.

CORMEN, T. H.; LEISERSIN, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to Algorithms**. Cambridge, MA: MIT Press, 2009. 1292 p.

CORONA, E.; LEMOS, C. A. C. **Dicionário da Arquitetura Brasileira**. São Paulo: Companhia das Artes, 1998. 472 p.

COTTA, A. C.; ANDERY, P. R. P. As alterações no processo de projeto das empresas construtoras e incorporadoras devido à NBR 15575 – Norma de Desempenho. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 133-152, jan./mar. 2018.

DE PAULA, N.; MELHADO, S. B. Sustainability in Management Processes: Case Studies in Architectural Design Firms. **Journal of Architectural Engineering**, v. 24, n. 4, 2018. 9 p.

DE PAULA, N.; ARDITI, D.; MELHADO, S. B. Managing sustainability efforts in building design, construction, and facility management firms. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 24, n. 6, 2017. p. 1040-1050.

DESKTOP RADIANCE 2.0 BETA USER MANUAL, Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division, Building Technologies Department. Disponível em: https://floyd.lbl.gov/downloads/user_man20B.pdf. Acesso em: 22 nov. 2020.

DORNELLES, K.; A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DOS SANTOS, T. L.; PORTO, F. H. F. dos S.; SILVA, A. S. Análise da correlação entre conforto e desempenho térmico em habitações de interesse social por simulação computacional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 211-229, abr./jun. 2020

DUARTE, D. O clima urbano e o ambiente construído. *In*: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K (Orgs.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. p. 155-179.

ELALI, G, A.; PINHEIRO, J. Q. Analisando a experiência do habitar: algumas estratégias metodológicas. *In*: VILLA, S. B.; ORNSTEIN, S. W. (Orgs.). **Qualidade ambiental na habitação: avaliação pós-ocupação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 15-35.

EMPRESA DE ARQUITETURA. **Trajetória Projetual**, 2015.

EMPRESA DE ARQUITETURA. **Apresentação do método de implementação aos colaboradores**, 2020.

EMPRESA DE ARQUITETURA. **Sistema de Gestão da Qualidade Eletrônico (e-SGQ)**, 2021a.

EMPRESA DE ARQUITETURA. **Projeto residencial em São José do Rio Preto - SP**, 2021b.

FERREIRA, F. L.; PRADO, R. T. A. Medição do albedo e análise de sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/351, 12p.

FLORIO, W. **O Uso de Ferramentas de Modelagem Vetorial na Concepção de uma Arquitetura de Formas Complexas**. São Paulo, 2005. 477 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FLORIO, W. Modelagem paramétrica, criatividade e projeto: Duas experiências com estudantes de arquitetura **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.6, n. 2, p. 44-66, 2011.

FRAMPTON, K. **História crítica da arquitetura moderna**. São Paulo: Martins Fontes, 2003. 470 p.

GERENTES DE PROJETO. **Relatos concedidos ao Autor**, São Paulo, 12 de abr. 2021.

GENSLER. **Research&Insight**. Disponível em: <https://www.gensler.com/publications>
Acesso em: 15 de mar. 2021

GRUBER, P. Biomimetics in Architecture [Architekturbionik]. *In*: GRUBER, P.; BRUCKNER, D.; HELLMICH, C.; SCHMIEDMAYER, H.; STACHELBERGER, H.; GEBESHUBER, I. (Eds). **Biomimetics – Materials, Structures and Processes: Examples, Ideas and Case Studies**. Berlin: Springer – Verlag, 2011. p. 127-148

HENSEL, M. **Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment**. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. 152 p.

HERNANDEZ, A. Fundamentos da simulação energética de edificações. *In*: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K (Orgs.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. p. 285-295.

HOUAISS, A. **Minidicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2004.

HU, Y.; CHEN, C.; SU, C. Exploring the Effectiveness and moderators of Block-Based Visual Programming on Student Learning: A Meta-Analysis. **Journal of Educational Computing Research**, v. 58, n. 8, p. 1467-1493, 2021.

IVERSEN, A.; ROY, N.; HVASS, M.; JØRGENSEN, M.; CHRISTOFFERSEN, J.; OSTERHAUS, W.; JOHNSEN, K. Daylight calculations in practice: An investigation of the ability of nine daylight simulation programs to calculate daylight factor in five typical rooms. **Danish Building Research Institute**, Aalborg University, 2013. Disponível em: <https://vbn.aau.dk/en/publications/daylight-calculations-in-practice-an-investigation-of-the-ability> Acesso em: 20 abr. 2021.

JABI, W. SOE, S.; THEOBALD, P.; AISH, R.; LANNON, S. Enhancing parametric design through non-manifold topology. **Design Studies**, v. 52, p. 96-114, 2017.

JENCKS, C. **Architecture 2000 and Beyond: Success in the Art of Prediction**. Chichester: Wiley-Academy, 2000. 140 p.

JONES, N. L. **Validated Interactive Daylighting Analysis for Architectural Design**. 2017. 154 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Architecture: Building Technology) – Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2017.

KALAY, Y. E. **Modeling objects and environments (Principles of Computer Aided Design)**. Chichester: Wiley-Interscience, 1989. 402 p.

KNUTH, Donald E. **The art of computer programming: fundamental algorithms – Volume 1**. Reading: Stanford University / Addison-Wesley, 1997. 650 p.

KOLAREVIC, B. Digital Morphogenesis. In: KOLAREVIC, B. (Ed.). **Architecture in the digital age: Design and Manufacturing**. New York: Spon Press, 2003. p. 17 – 45.

KIESLER, F. J. On Correalism and Biotechnique – Definition and Test of a new approach to building design. **Architectural Record**, n. 86, sept, 1939. p. 60-76. Disponível em: <https://usmodernist.org/AR/AR-1939-09.pdf> Acesso em 28 dez. 2020.

KIRSCHNER, M. J. **Visual Programming in Three Dimensions: visual representations of computational mental models**. 2015. 97 f. Thesis (Master of Science) – Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, 2015.

LEATHERBARROW, D. Foreword. In: HENSEL, M. **Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment**. Chichester: John Wiley and Sons, 2013. p. 9-14

LE CORBUSIER. **A Carta de Atenas**. São Paulo: HUCITEC: EDUSP, 1993.

LEITNER, D. S.; SCHEER, S.; SANTOS, A. P. L. O uso do BIM para avaliação do desempenho dos edifícios: uma revisão sistemática da literatura. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.14, n. 2, p.17-33, 2019.

LÍDER DE PROJETO. **Relato concedido ao Autor**, São Paulo, 12 de abr. 2021.

LYNN, G. **Folds, bodies & blobs**. Brussels: La Lettre Volée, 1998, 236 p.

MACKEY, C. **Pan Climatic Humans: Shaping Thermal Habits in an Unconditioned Society**. 2015. 158 f. Thesis (Master of Science in Architecture: Building Technology) – Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, 2015.

MACKEY, C. **Ladybug Tools for Grasshopper 1.0.0 Release**, 2020. Disponível em: <https://discourse.ladybug.tools/t/ladybug-tools-for-grasshopper-1-0-0-release/11241> Acesso em 01 mai. 2021

MACKEY, C. **E-mail ao autor desta pesquisa**. 2021

MACKEY, C.; ROUDSARI M. S. The Tool(s) Versus The Toolkit. In: DE RYCKE *et al.* (eds). **Humanizing Digital Reality**. Springer: Singapore, 2018. p. 93-101.

MARDALJEVIC, J. **Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients**. 2000. 313 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University Leicester, Leicester, 2000.

MCLUHAN, M. **Os meios de comunicação como extensões do homem**. São Paulo: Cultrix, 2007. 407 p.

MENEZES, N. N. C. **Introdução à Programação com Python: Algoritmos e lógica de programação para iniciantes**. São Paulo: Novatec, 2016. 328 p.

MILLER, N. The Hangzhou Tennis Center: A Case Study in Integrated Parametric Design. In: ASSOCIATION for COMPUTER AIDED in ARCHITECTURE, ACADIA Parametricism (SPC) 2011. **Proceedings...** Lincoln: University of Nebraska, 2011, p. 141-148.

MINTZBERG, H. **Criando Organizações Eficazes: Estruturas em Cinco Configurações**. São Paulo: Editora Atlas, 2009.

MONEDERO, J. Parametric design: a review and some experiences. **Automation in Construction**, v. 9, n. 4, 2000. P. 369-377.

MONTANER, J. M. **Sistemas arquitetônicos contemporâneos**. Barcelona: Gustavo Gili, 2009. 224 p.

MONTEIRO, L. M.; BITTENCOURT, L. Arquitetura da adaptação. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K (Orgs.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. p. 27-55.

NGUYEN, A.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, 2014. p. 1043-1058.

NOME, N.Q. **Artefatos geradores de microclima: biomimética, parametrização e prototipagem rápida na busca por soluções bioclimáticas para clima quente e úmido**. 135 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

ORTIZ, M. A.; KURVES, S. R.; BLUYSSSEN, P. M. A review of comfort, health, and energy use: Understanding daily energy use and wellbeing for the development of a new approach to study comfort. **Energy and Buildings**, v. 152, 2017. p. 323-335.

OXMAN, R. Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium, **Design Studies**, v. 29, 2008a. p. 99-120.

OXMAN, R. Performance-Based Design: Current Practices and Research Issues, **International Journal of Architectural Computing**, v. 6, n. 1, 2008b. p. 1-17.

PERKINS&WILL. **Research Journal**, 2021. Disponível em: <http://research.perkinswill.com/labs/journals/> Acesso em: 15 de mar. 2021.

PETERS, B. Computation Works: The Building of Algorithmic Thought. **Architectural Design**, v. 83, n. 2, 2013. p. 8-15.

PETERS, B. Defining Environments: Understanding Architectural Performance through Modelling, Simulation and Visualisation. **Architectural Design**, v. 88, n. 1, 2018. p. 83-91.

PETERS, B.; PETERS, T. **Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design**. Chichester: John Wiley&Sons, 2013. 265 p.

PENTEADO, A. P. B.; BRANQUINHO, R. V. ESPERIDIÃO, A. R.; FAGANELLO, A. M. P. IARONZINSKI NETO, A. O desempenho da habitação, a satisfação e o comportamento potencial e a relação com o gênero do indivíduo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2020, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

PIANO, R. **A responsabilidade do arquiteto**. São Paulo: BEI, 2011. 149 p.

PIANO, R. **Renzo Piano: The Complete Logbook 1966-2016**. London: Thames & Hudson, 2016. 419 p.

RAMAN, M. Sustainable design: An American perspective. *In: KOLAREVIC B. & MALKAWI A. (Eds.). **Performative Architecture: beyond instrumentality***. New York: Spon Press, 2005. p. 43 – 54.

ROUDSARI, M. S. **Honeybee [+] 0.0.3 Release Notes for Grasshopper and Dynamo**, 2017. Disponível em:
<https://www.grasshopper3d.com/group/ladybug/forum/topics/honeybee-0-0-3-release-notes-for-grasshopper-and-dynamo> Acesso em 01 mai. 2021

ROUDSARI, M. S.; PAK, M. Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. *In: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, 2013, Chambéry, France. **Proceedings...** Chambéry, France, 2013. p. 3128-3135.*

SÃO PAULO (Município) Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014. **Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo**. São Paulo, SP, 2014. Disponível em:
<http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-16050-de-31-de-julho-de-2014> Acesso em 05 dez. 2020

SALGADO, M.S.; MAGALHÃES, C.R.; SANTOS, E.R.; CANUTO, C.L. A GESTÃO DE PROJETOS E AS TECNOLOGIAS DIGITAIS: estratégia BIM-BR e tendências pós-pandemia. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2020, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

SETTING RENDERING OPTIONS, Disponível em:
https://floyd.lbl.gov/radiance/refer/Notes/rpict_options.html. Acesso em: 22 nov. 2020.

SCHERER, R.; SIDDIQ, F.; VIVEROS, B. S. The cognitive benefits of learning computer programming: A meta-analysis of transfer effects. **Journal of Educational Psychology**, v, 111, n. 5, 764–792, 2019.

SCHUMACHER, P. Parametricism as Style. **11th Architecture Biennale**, Venice, 2008. Disponível em: www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm Acesso em: 21 mar. 2021.

SHUTE, V. J.; SUN, C.; ASBELL-CLARKE, J. Demystifying computational thinking. **Educational Research Review**, v. 22, 142–158, 2019.

SENA, P. C. P. **Automação de processos de projeto e programação em BIM: Dynamo, Python e C#**. 2019. 201 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

SILVA, K. L.; MUSSI, A. Q.; SILVA, T. L.; ZARDO, P.; RIBEIRO, L. A. Desenvolvimento de plug-ins voltados para a análise de requisitos da norma de desempenho brasileira. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 14, n. 2, p.46-64, 2019.

SOM – SKIDMORE, OWINGS & MERRILL. **Research**. Disponível em: <https://www.som.com/ideas/research> Acesso em 15 de mar. 2021

STALDER, F. **The Digital Condition**. Cambridge: Polity Press, 2018. 220 p.

TEDESCHI, A. **AAD_Algorithms-Aided Design: Parametric Strategies using Grasshopper**. Brienza (Potenza): Le Penseur, 2014. 495 p.

TERZIDIS, K. **Algorithmic Architecture**. Burlington, MA: Elsevier, 2006. 159 p.

THOMPSON, D. **On Growth and Form**. Cambridge: Cambridge University Press, 1961. 346 p.

THORNTON TOMASETTI. **Design Explorer**. Disponível em: <http://core.thorntontomasetti.com/design-explorer/> Acesso em 15 de mar. 2021

TRAMONTANO, M. Quando pesquisa e ensino se conectam: design paramétrico, fabricação digital e projeto de arquitetura. In: XIX Congresso da Sociedade Ibero-americana de Gráfica Digital – SIGRADI, 2015, São Carlos. **Anais...** p. 544-550.

VEIGA, B. T. M. **Oscar Niemeyer: modelagem paramétrica e fabricação digital de edifícios curvilíneos do Parque Ibirapuera e do Memorial da América Latina**. 2016. 320 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2016.

VEIGA, B. T. M.; FLORIO, W. O método analítico paramétrico para revelar o modus operandis de Oscar Niemeyer. **Revista Educação Gráfica**, Bauru, v. 20, n. 3, 21 p. 2016.

WHITEHEAD, H.; HESSELGREN, L.; PARRISH, J. The Origins of Smartgeometry. In: PETERS, B.; PETERS, T. **Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design**. Chichester: John Wiley&Sons, 2013. p. 20-35.

WOODBURY, R. **Elements of Parametric Design**. New York: Routledge, 2010. 300p.

WORTMANN, T.; TUNÇER, B. Differentiating parametric design: Digital workflows in contemporary architecture and construction, **Design Studies**, v. 52, 2017. p. 173-197.

ZANATTA, B. Casas e apartamentos amplos são mais buscados no isolamento social. **O Estado de S. Paulo**, São Paulo, 28 jun. 2020. Economia & Negócios. Disponível em: <https://economia.estadao.com.br/blogs/radar-imobiliario/casas-e-apartamentos-amplos-sao-mais-buscados-no-isolamento-social/>. Acesso em: 30 jan. 2021.

ZARDO, P.; MUSSI, A. Q.; SILVA, J. L. da. Tecnologias digitais no processo de projeto contemporâneo: potencialidades e desafios à profissão e à academia. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 425-440, abr./jun. 2020.

ZEVI, B. **Towards an Organic Architecture**. London: Faber & Faber Limited, 1950. 179 p.

ZUMTHOR, P. **Atmosferas**. Barcelona: Gustavo Gili, 2006. 75 p.

APÊNDICE A – RELATOS DOS GERENTES DE PROJETO

GERENTE DE PROJETO A

É essencial que os espaços das edificações sejam projetados com o objetivo de possibilitar segurança, conforto e qualidade de vida para os seus usuários de uma maneira responsável, comprometida com os conceitos da sustentabilidade e com a economia de recursos energéticos, além de permitir um convívio harmonioso entre o homem e o meio ambiente.

As normas técnicas pertinentes estabelecem requisitos, critérios e métodos de avaliação para garantir o cumprimento do desempenho das edificações (em diferentes níveis) quanto às exigências dos usuários relativas à segurança, habitabilidade e sustentabilidade.

Os projetos desenvolvidos na (*Nome da empresa omitido*) integram os conceitos de Arquitetura Bioclimática, que tomam por base a compreensão dos determinantes de conforto impostos pelas condições do clima local, em especial pela relação entre amplitude térmica e umidade, a incidência de radiação solar e a intensidade dos ventos predominantes.

Elaboramos análises de desempenho lumínico nos projetos que desenvolvemos visando atender os níveis adequados de iluminação natural para os ambientes internos das edificações (para reduzir a necessidade de uso da iluminação artificial durante o dia e evitar o sobreaquecimento do edifício ou ofuscação dos usuários no caso de luz excessiva). Estas simulações consideram o contexto em que a edificação está inserida e oferecem dados importantes que contribuem para o processo de conceituação dos projetos, resultando no aumento da qualidade dos espaços projetados e do conforto dos seus usuários.

No processo complexo de conceituação dos projetos de Arquitetura as simulações lumínicas, de sombras etc., têm papel fundamental no resultado final dos espaços criados e são percebidas não somente pelos seus usuários, mas também pelos demais intervenientes, em especial os projetistas parceiros que tomam partido destas informações para o desenvolvimento dos projetos de Paisagismo, Interiores, etc., agregando maior valor para os empreendimentos.

GERENTE DE PROJETO B

Desde a entrada em vigor da Norma de Desempenho, uma das questões de grande preocupação por parte dos arquitetos é o atendimento à iluminação. O cálculo de lux depende de conhecimentos e softwares específicos que não são de domínio da maior parte dos arquitetos, deixando os escritórios dependentes de consultorias externas que em geral são contratadas num momento avançado de projeto, no qual as possibilidades de adequação do mesmo para atendimento da iluminação são cada vez mais restritas em função de prazos e custos.

A incorporação do cálculo lumínico no processo de projeto do escritório nos permitiu a realização de análises preliminares nos momentos iniciais de projeto, quando ainda é possível fazer adequações mais drásticas sem incorrer em grandes custos de retrabalhos, auxiliando nas tomadas de decisão de implantação e configurações de tipologias habitacionais. Além disso, sem depender de terceiros pudemos desenvolver em alguns casos simulações pontuais adicionando mudanças gradativas ao projeto e desta forma podendo comparar resultados e decidir quais as melhores estratégias a adotar para atendimento à Norma. Desta forma, há uma compreensão maior por parte dos envolvidos neste processo sobre o comportamento da luz em diversas situações de projeto, permitindo cada vez mais anteciparmos situações nas quais podemos ter dificuldades de atendimento à Norma e buscar as melhores soluções de projeto.

Ainda assim, os cálculos internos têm sido adotados para verificar situações mais críticas a fim de alertar o cliente para encaminhar a um consultor especializado quando necessário para validação deles, mas sem a intenção de ser a documentação comprobatória de atendimento à Norma a qual continuamos entendendo ser necessário o envolvimento de uma empresa especializada.

APÊNDICE B – RELATO DE UM LÍDER DE PROJETO

Realizamos as simulações lumínicas nas unidades do empreendimento para melhor entender a restrição do posicionamento das cores e os índices de reflexão/absorção da fachada, e avaliar o tamanho das aberturas do projeto, de modo a solucionar as dificuldades encontradas com o atendimento a norma de desempenho.

Verificamos que as cores das fachadas dos edifícios influenciavam no desempenho lumínico dos ambientes do projeto, com a análise, conseguimos identificar os trechos da fachada onde poderíamos adotar cores um pouco mais escuras e os trechos onde deveríamos propor cores claras.

A substituição das cores de alguns trechos de fachada, por tons com maior índice de refletância auxiliou o atendimento dos critérios de iluminação, sem grandes ajustes nas unidades.

Além da verificação das cores das fachadas, foram simuladas algumas alternativas de planta, por meio da manipulação de algumas dimensões de projeto, como o tamanho dos caixilhos da Sala e Área de Serviço e a largura e profundidade de algumas reentrâncias das fachadas do empreendimento, de modo a verificar quais soluções de projeto provocariam maior desempenho lumínico.

Foi detectado que um pequeno aumento de 10 ou 15 cm na largura dos caixilhos acarretava em um grande incremento no desempenho lumínico dos ambientes do projeto. O aumento da largura das reentrâncias também melhorava a condição interna dos ambientes, porém devido aos recuos do projeto esta solução não foi viabilizada.

A simulação interna dos índices de iluminação natural foi extremamente importante para as decisões de projeto, pois permitiram o entendimento das condições de iluminamento natural dos ambientes e facilitaram a busca dos conjuntos de alternativas necessárias para melhorar os índices de desempenho do projeto, sem gerar grandes impactos no produto proposto, tanto em função das cores das fachadas e elementos adjacentes quanto em relação ao ajuste da dimensão dos vãos de iluminamento.

APÊNDICE C – RELATO DE UM ARQUITETO DA EMPRESA

VISÃO GERAL DO ALGORITMO

O algoritmo está voltado para a verificação do projeto frente aos requisitos de desempenho lumínico da NBR 15575. O processo criado é bastante interessante por garantir a interoperabilidade entre o modelo do Archicad e o software de análise do Grasshopper, através de uma abordagem bastante eficiente que interpreta as geometrias do software de modelagem com base nos layers em que foram construídas. Esse processo economiza um precioso tempo, que seria de outra forma despendido remodelando os edifícios, que por sua vez, já possuem um certo grau de complexidade indicando paredes, lajes, janelas e portas. Do ponto de vista do usuário, de maneira simples e eficaz, o algoritmo cria as imagens que ilustram o desempenho dos ambientes analisados.

MATERIAL DE APOIO

O material de apoio está bem estruturado e serve tanto para ensinar os preceitos básicos da simulação de desempenho lumínico, quanto para orientar o usuário na manipulação do algoritmo. Ele foi consultado diversas vezes no decorrer do processo.

Na minha experiência de utilização, a etapa de instalação dos softwares e licenças foi um pouco trabalhosa, gerando certa frustração no início do processo em relação à atualização dos componentes, softwares e afins.

No entanto, este é um caso particular no qual eu já havia instalado em minha máquina outras versões dos mesmos programas. Ainda assim, nesse sentido, em vista do algoritmo ser compatível somente com uma determinada versão do Rhino ou Grasshopper, pode ser um impeditivo ou motivo de desânimo, ao resolver as questões técnicas e operacionais, a fim de se utilizar o programa.

O processo descrito está bastante claro e funciona bem para os projetos já modelados no padrão da empresa, estando os ambientes com janelas, portas e paredes definidas. No geral o manual está bem ilustrado e não ficam dúvidas no passo a passo necessário. A importação do modelo no Rhino também é simples, assim como carregar, executar e rodar os scripts para organização de layers.

Talvez tenha faltado exemplificar que quanto mais simples o modelo, mais rápida será a análise, por exemplo, em um edifício alto, poder-se-ia exportar somente o pavimento de análise, deixando o restante como uma volumetria simples. Mas entendo que isso é caso a caso, e em alguns empreendimentos pode gerar ainda mais trabalho.

Eu já possuía certa familiaridade com os comandos básicos do Rhino, mas o manual está bem ilustrado e acredito que um usuário sem familiaridade com o software conseguirá facilmente se adaptar ao programa.

USABILIDADE DO ALGORITMO

O Grasshopper possui uma lógica completamente diferente dos outros programas de modelagem podendo tornar-se impeditivo para usuários novos. No entanto, a maneira como o algoritmo foi montado contorna este obstáculo. Mesmo alguém com pouca ou nenhuma familiaridade pode manipular facilmente o algoritmo, de forma semelhante a usar uma planilha de Excel, onde basta inserir os dados de entrada. O passo a passo está bem descrito e focado nos horários para a análise da norma. Também estão devidamente detalhados os pormenores de onde salvar os arquivos corretamente, configurações de arquivos e afins.

O único ponto que gerou alguma confusão, no meu caso, foi o da resolução de imagem, que não havia ficado claro que, ao ajustar o fator de rapidez, eu deveria também me atentar para que o número resultante no painel estivesse entre 120 e 130.

Para o restante o processo está bem claro, mesmo a realização primeiro de uma simulação com “*ambient bounces*” de 3, para somente depois em ambientes problemáticos detalhar-se com uma precisão mais elevada.

INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados são de fácil e imediata interpretação, bastando ler a quantidade de lux e validá-los conforme a norma para o horário e ambiente designados. A princípio não é necessária uma compreensão profunda do fenômeno da luz na arquitetura nem um repertório anterior de simulações realizadas. Mesmo assim, é interessante validar os resultados com os membros mais experientes do escritório, reiterando se fazem sentido com as condições do edifício.

RETROALIMENTAÇÃO PARA TOMADA DE DECISÃO

Caso o resultado não atinja os critérios normativos, o processo de alteração do projeto está bem delineado. Para as eventuais alterações e estratégias projetuais, foi produzido um segundo material de apoio, que exemplifica a influência de fatores como obstruções, contenções, refletividade das superfícies, tamanho das aberturas e profundidade dos ambientes. Dessa forma, o arquiteto poderia realizar as alterações necessárias para então rodar novamente o processo.

No entanto, um ponto crítico na simulação é o longo tempo de análise, podendo demorar meia hora uma análise detalhada. Em alguns casos, como havia ocorrido comigo em simulações anteriores, o usuário pode ter esquecido algum ponto como abrir uma janela ou porta, ou mesmo ocorrer algum erro de geometria que não estava antes evidente, e acaba por descartar a simulação gerada.

Este processo tende a ser truncado no tocante à obtenção dos resultados e à alteração do modelo. Ainda assim, o algoritmo atinge de maneira eficaz o seu objetivo de avaliar se determinado projeto atende ou não a norma de desempenho.

Nesse sentido, seria interessante um algoritmo mais rápido e simplificado, a ser utilizado em momentos nos quais os projetos são mais simples, geralmente ainda isentos de definições exatas dos tamanhos das aberturas, espessura de paredes e afins, ocasião oportuna para a simulação realizada concomitante ao projeto, auxiliando na tomada de decisão. De nenhuma maneira este fato descarta o algoritmo criado, mas pode-se adaptá-lo para outras abordagens complementares atuando juntas sobre processo de projeto em suas diversas fases.