

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ARQUITETURA E URBANISMO
CURSO DE ENGENHARIA DIGITAL E TECNOLOGIA BIM

DIEGO NOGOSSEK DA ROCHA

**APLICAÇÃO DO BIM 6D EM UM PROJETO DE EDIFÍCIO COMERCIAL A PARTIR
DO PROJETO GENERATIVO**

CURITIBA

2019

DIEGO NOGOSSEK DA ROCHA

**APLICAÇÃO DO BIM 6D EM UM PROJETO DE EDIFÍCIO COMERCIAL A PARTIR
DO PROJETO GENERATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia Digital e Tecnologia BIM, do Departamento Acadêmico de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Fábio Freire

CURITIBA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

APLICAÇÃO DO BIM 6D EM UM PROJETO DE EDIFÍCIO COMERCIAL A PARTIR DO PROJETO GENERATIVO

por

DIEGO NOGOSSEK DA ROCHA

Esta Monografia foi apresentada em 10 de setembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de **Especialista em ENGENHARIA DIGITAL E TECNOLOGIA BIM**. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Fábio Freire
Prof. Orientador

Heverson Akira Tamashiro
Membro titular

Marcelo Queiroz Varisco
Membro titular

RESUMO

O desempenho energético vem se tornando um requisito cada vez mais importante na área da construção civil. A aplicação do processo BIM em conjunto com o projeto generativo permite prever, em fase de concepção, o comportamento da edificação e adaptar o projeto para ter uma maior eficiência energética. Este trabalho busca verificar a utilização do projeto generativo para desenvolver um estudo de fachada de uma edificação de modo a ter um melhor desempenho energético. Para isso, foi modelado um edifício de escritórios no ARCHICAD. O modelo foi integrado com o programa Rhinoceros e o seu *plug-in* Grasshopper. Neste último, foi feita uma rotina responsável pelas simulações de conforto térmico e lumínico, em conjunto com os programas Energyplus, Radiance. Ele interpreta e coleta as informações do modelo proveniente do ARCHICAD e gera a fachada. Para otimizar a forma da envoltória a partir das simulações, foi utilizado um *plugin* do grasshopper chamado Galápagos. Feito isso, o modelo voltou com o resultado pronto para o ARCHICAD, mantendo um processo bilateral. Os resultados demonstraram um aumento no desempenho energético da edificação com a aplicação da otimização a partir da aplicação do projeto generativo. Constatou-se também a importância do conhecimento sobre iluminação solar e conforto ambiental, de modo a criar uma envoltória que tenha parâmetros que permita uma otimização mais eficiente.

Palavras-chaves: BIM 6D. Projeto generativo. Eficiência energética.

ABSTRACT

Energy performance has become an increasingly important requirement in the field of construction. The application of the BIM process together with the generative design allows to predict, at the design stage, the behavior of the building and adapt the project to have a greater energy efficiency. This work seeks to verify the use of the generative project to develop a study of the facade of a building in order to have a better energy performance. For this, an office building was modeled on the ARCHICAD. The model was integrated with the Rhinoceros program and its Grasshopper plugin. In the latter, a routine was made responsible for the simulations of thermal and light comfort, in conjunction with the Energyplus, Radiance programs. It interprets and collects information from the model coming from the ARCHICAD and generates the facade. To optimize the shape of the envelope from the simulations, a grasshopper plugin called Galapagos was used. This done, the model returned with the result ready for the ARCHICAD, maintaining a bilateral process. The results showed an increase in the energetic performance of the building with the application of the optimization from the application of the generative project. It was also verified the importance of knowledge about solar lighting and environmental comfort, in order to create an envelope that has parameters that allow a more efficient optimization.

Keywords: BIM 6D. Generative Design. Energy performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - BIM no ciclo de vida das edificações	12
Figura 2 - Elementos da gramática da forma	29
Figura 3 - Sobreposição dos quadrados A e B e emergência do quadrado C	29
Figura 4 - Fluxo de trabalho	34
Figura 5 - Perspectiva	35
Figura 6 - Planta	35
Figura 7 - Rotina no Grasshopper	37
Figura 8 - Definição da zona	38
Figura 9 - Sede da Thyssenkrupp AG	39
Figura 10 - Edifício do campus da University Southern Denmark	39
Figura 11 - Parâmetros da envoltória	40
Figura 12 - Perspectiva dos elementos sombreadores	45
Figura 13 - Planta dos elementos sombreadores	46
Figura 14 - Luz Diurna Anual (ALD).	47
Figura 15 - Iluminância Útil da Luz Natural (IULN)	48
Figura 16 - Modelo Final	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos materiais	41
Tabela 2 - Características dos materiais da parede cortina.....	42
Tabela 3 - Código das cores das superfícies.....	42
Tabela 4 - Parâmetros finais.....	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO GERAL	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.3 JUSTIFICATIVA	10
2. BIM 6D	11
2.1 SIMULAÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	16
2.1.1 Análise de incidência solar	19
2.1.2 Análise termoenergética	21
2.1.3 Análise de ventilação natural	22
3. PROJETO GENERATIVO	24
3.1 GRAMÁTICA DA FORMA	27
3.2 ALGORITMOS EVOLUTIVOS	30
4. METODOLOGIA	33
4.1 MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO	34
4.2 DESENVOLVIMENTO DA ROTINA ALGORÍTMICA.....	36
5. RESULTADOS	45
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável e a utilização racional da energia têm sido cada vez mais abordados em pesquisas e no desenvolvimento de novas tecnologias. Essa preocupação também está presente no setor da construção civil, no qual há um crescimento na busca de materiais e soluções que reduzam os impactos negativos no meio ambiente, do mesmo modo, que um aumento no desenvolvimento de projetos que busquem uma melhor eficiência energética nas edificações.

A grande demanda por construções sustentáveis se justifica em razão do setor da construção civil ser considerado um dos principais responsáveis pela geração de impactos no meio ambiente. De acordo com Mass, Scheer e Tavares (2016), uma parte significativa dos impactos gerados por uma edificação, considerando todo o seu ciclo de vida, é determinada por decisões tomadas durante a concepção do projeto.

No modelo tradicionalmente utilizado para o desenvolvimento de projetos não é possível antecipar, com precisão, decisões prevendo potenciais consequências, sendo possível apenas analisar o desempenho após a conclusão do projeto. Diante desse cenário, o processo BIM (Modelagem da Informação na Construção) pode contribuir para inúmeras análises do projeto, uma vez que permite gerar um modelo multidisciplinar, do qual é possível extrair e analisar dados que podem gerar informações para ser utilizados em tomadas de decisões, inclusive é possível fazer simulações para avaliar a eficiência energética de uma edificação.

A utilização do BIM para esse tipo de simulação é ainda relativamente recente e alguns aplicativos não possuem interoperabilidade¹. Apesar de ser mais eficiente quando apresentado no início do projeto, a maioria das análises energéticas são feitas na fase final de projeto, apenas para o atendimento de normas de desempenho energético e não para maximizar a eficiência energética da construção (ABDI, 2018b).

Destaque-se ainda que, além de não possuir em algumas situações, uma aplicabilidade intuitiva, as simulações de eficiência energética são realizadas de forma unidirecional. As ferramentas de simulação não possuem a capacidade de transferir

¹ Interoperabilidade é a capacidade de um sistema (informatizado ou não) de se comunicar com outro sistema (semelhante ou não). Para um sistema ser considerado interoperável é muito importante que ele trabalhe com padrões abertos (N. do autor).

as alterações do modelo de energia para a ferramenta de criação. Qualquer alteração necessária no modelo de simulação de energia deve ser realizada no programa de autoria. Essa ida e volta de modelo pode ocorrer inúmeras vezes, até atingir o resultado pretendido.

A aplicação do projeto generativo pode otimizar esse processo. Este é um modo de projeto indireto, onde o objetivo não é a forma em si, mas um conjunto de soluções geradas a partir de um método. Parte-se dos resultados pretendidos, e por meio de parâmetros e algoritmos, são exploradas inúmeras alternativas. Estes parâmetros podem ser gerados a partir de simulações de conforto térmico e lumínico de modo a criar uma forma arquitetônica com uma maior eficiência energética (UMAKOSHI, 2014).

1.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar o processo generativo para modelagem da envoltória de um edifício comercial, tendo como foco as premissas do processo BIM 6D.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os conceitos do BIM 6D e sobre a aplicação de simulações de conforto térmico e lumínico em projeto de edificação;
- Estudar os conceitos do projeto generativo;
- Modelar um edifício comercial (hipotético) em um *software* de autoria (ARCHICAD);
- Modelar a envoltória do edifício comercial, procurando alcançar a eficiência energética, utilizando *software* de programação visual (Grasshopper) e de um solucionador evolutivo (Galápagos), mantendo um nível de interoperabilidade bidirecional.
- A analisar e apresentar as conclusões geradas a partir dos resultados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Uma das dificuldades encontradas nas simulações de eficiência energética é conseguir compreender os diversos dados gerados e traduzi-los em soluções arquitetônicas, principalmente em projetos mais complexos. A adoção do projeto generativo tende a facilitar isso, uma vez que é possível analisar uma grande quantidade de informações, devido à capacidade de processamento computacional, e encontrar a melhor solução para determinado problema.

Assim, pretende-se verificar as vantagens e desvantagens desse processo. Para isso, será realizada otimização da envoltória de um edifício comercial, uma tipologia que apresenta grande demanda de consumo energético. O foco nas fachadas é devido ao fato delas desempenharem um papel importante no conforto ambiental das edificações, tanto nas trocas de calor do ambiente interno com o externo, quanto pela admissão de luz natural dentro do edifício.

2. BIM 6D

BIM (*Building Information Modeling*) é um conceito antigo, apresentado pela primeira vez por Chuck Eastman, em 1975, na já extinta revista AIA journal, sendo que a terminologia *Building Information Modeling* só começou a ser empregada anos depois, a partir de 1986 (ABDI, 2017a). Segundo Eastman et al. (2008), o BIM é uma das tecnologias mais promissora da indústria AEC (arquitetura, engenharia e construção). Com ela é possível criar um modelo virtual preciso do edifício, que contém informações que servem de apoio tanto durante a fase de projeto quanto no momento da construção da edificação.

Mais do que um conjunto de *softwares*, o BIM é um processo que se baseia no compartilhamento das informações entre os agentes participantes do processo construtivo. Ele procura se adaptar às diferentes camadas de conhecimentos, de modo que cada equipe envolvida consiga fornecer, a partir de sua própria metodologia de trabalho, os seus dados de projetos e, assim, alimentar o modelo central (KRYGIEL; NIES, 2008; SILVA JR, 2016).

Para que isso ocorra de forma correta, sem perda de informações, é importante existir uma interoperabilidade entre os aplicativos utilizados. Pensando nisso, foi criado o padrão IFC (*Industry Foundation Class*). Esse formato de arquivo permite importar e exportar entre os programas BIM – que a princípio não têm uma forma de comunicação direta entre si – a modelagem 3D e a classificação de seus elementos, carregando consigo dados relevantes para cada etapa de projeto (EASTMAN et al, 2008).

O objetivo do BIM é permitir uma visão geral do edifício, dentro de um mesmo modelo paramétrico, de modo a ter uma maior otimização do projeto. Além de proporcionar a geração de uma documentação bem detalhada, o BIM possibilita verificar possíveis incompatibilidades entre as disciplinas, analisar o desempenho da edificação, estimar custos e planejar a construção (KRYGIEL; NIES, 2008). Em um nível mais avançado, ainda é possível aplicar o BIM durante todo o ciclo de vida do edifício, tanto no que se refere a sua manutenção, reutilização e demolição, como poder ser verificado na Figura 1 (ABDI, 2017a). Assim, é possível antecipar possíveis adversidades no decorrer da sua construção, ou durante a sua operação, e solucioná-las ainda dentro da fase de projeto.

Figura 1 - BIM no ciclo de vida das edificações



Fonte: ABDI (2017).

Devido aos diversos tipos de informações e aplicações em várias etapas projetuais, o BIM é dividido, conforme Martins (2018), nas seguintes dimensões:

- 3D – Modelagem: definição da geometria e dos materiais;
- 4D – Planejamento: simulação detalhada da construção e das fases de projeto;
- 5D – Orçamento: obtenção dos quantitativos para estimação dos custos;
- 6D – Sustentabilidade²: análise energética e certificação;
- 7D – *Facility Management*: *as built* e manutenção da edificação.

O 6D, foco desta monografia, aborda as questões relacionadas à sustentabilidade. Ela possui uma forte influência nas demais dimensões, uma vez que ela considera todos os impactos gerados pela edificação, durante o seu ciclo de vida.

² Há uma divergência entre alguns quanto à definição do BIM 6D e 7D. Alguns relacionam o 6D à sustentabilidade e o 7D ao *Facility Management*. Outros o contrário. Para este trabalho, considerou-se a sustentabilidade pertencente ao 6D (N. do autor).

O desenvolvimento sustentável pode ser definido, conforme Krygiel e Nies (2008, p. 10, tradução do autor), como o “atendimento às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas próprias necessidades”. Segundo Mattana e Lebrelootto (2017), a sustentabilidade pode ser avaliada em diferentes dimensões, mas no mínimo será caracterizada em três aspectos: econômico, social e ambiental. O primeiro está relacionado ao retorno financeiro aos proprietários, à comunidade e a todos os envolvidos; o segundo envolve a responsabilidade social e gestão das pessoas; e, por fim, o último se preocupa com a redução de impactos ao meio ambiente e a preservação do mesmo.

Apesar de ser um dos principais responsáveis pelos impactos ambientais, o setor de construção civil ainda não aplica em sua totalidade os conceitos da sustentabilidade (MARTINS, 2018). De acordo com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (2014), estima-se que cerca de 50% do consumo dos recursos naturais no mundo é proveniente da construção civil. Além disso, há a questão da geração de resíduos, tanto na produção dos materiais, quanto no mau gerenciamento dos materiais em canteiro de obra. Segundo o mesmo conselho, são produzidos, em média, 5 kg de resíduos para cada 1 kg de material utilizado, no fim de sua vida útil. Quanto ao consumo de energia, estima-se que as edificações são responsáveis por 40% da demanda mundial. Isso levando em consideração a energia embutida de suas matérias-primas (extração, fabricação e transporte) e o gasto energético durante o seu funcionamento – o maior responsável pelo consumo.

Devido a demanda pelo desenvolvimento sustentável, têm-se criado normas que visam criar diretrizes para a construção de novas edificações. Em escala mundial, há como exemplo a ISO 52000-1:2017, que estabelece uma estrutura sistemática, abrangente e modular para avaliar o desempenho energético de edifícios novos e existentes de forma holística (International Organization for Standardization, 2019). Já no Brasil, há a NBR 15575. De acordo com Mattana e Lebrelootto (2017), a norma leva em consideração aspectos como durabilidade, manutenibilidade e impacto ambiental de construções residenciais. Contudo, a mesma exclui questões como habitabilidade, conforto, funcionalidade e flexibilidade, seguindo uma ideia contrária de normas internacionais.

Complementarmente a isso, há as certificações ambientais, como é o caso do LEED, Aqua e o Selo Azul da Caixa. De modo geral, essas certificações avaliam as

edificações por meio de parâmetros (localização, consumo de energia, impactos ambientais e etc.), obrigatórios, ou não, e a classificam conforme a pontuação atingida.

Em decorrência deste cenário, cada vez mais profissionais do ramo AEC vem buscando novas ferramentas que auxiliam em suas decisões de projeto com o objetivo de reduzir os impactos negativos ao meio ambiente relacionados à construção. Nesse sentido, a adoção do processo BIM tende a facilitar o atendimento das premissas da construção sustentável (OLIVEIRA; SCHEER; TAVARES, 2015).

Uma das características importantes do BIM é a sua multidisciplinaridade. Isso permite que vários profissionais, de áreas de conhecimentos diferentes, possam trabalhar de forma colaborativa, buscando soluções que adéquem a edificação aos conceitos de sustentabilidade, ainda durante a fase de projeto (MANZIONE³, 2013, apud MATTANA; LEBRELOTTO, 2017). Segundo Mass, Scheer e Tavares (2016), uma parte significativa dos impactos gerados por uma edificação, durante o seu ciclo de vida, é determinada por decisões tomadas durante a concepção do projeto. Como o BIM permite ter um maior controle e entendimento de alternativas e possíveis impactos, é possível propor soluções voltadas para a sustentabilidade ainda nessa fase, tornando-as mais efetivas.

Além disso, conforme Krygiel e Nies (2008), o BIM poder auxiliar nos seguintes aspectos:

- Orientação da edificação: verificar a melhor orientação, de modo a ter um melhor aproveitamento de luz natural, e conseqüentemente reduzir gastos energéticos com iluminação artificial;
- Volumetria: analisar o formato da edificação de modo a otimizar a entrada de luz natural e a incidência de radiação solar sobre o mesmo;
- Consumo de água: analisar meios de reduzir o seu consumo e criar sistemas de reaproveitamento;
- Desempenho energético: reduzir o consumo de energia por meio do aumento da eficiência dos sistemas de climatização e iluminação, além de analisar opções de fontes renováveis, como a energia solar;

³MANZIONE, L. **Proposição de uma estrutura conceitual de gestão do processo de projeto colaborativo com o uso do BIM**. 325 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2013.

- **Materiais:** verificar materiais que geram menos impactos ambientais, que tenham características que permitem um melhor conforto térmico, além de otimizar a aplicação destes materiais durante a construção de modo a reduzir a geração de resíduos.

Um dos pontos mais abordados sobre edificações sustentáveis, devido ao seu impacto nos custos do ciclo de vida, é a eficiência energética (LAINE; KAROLA, 2007). Esta está diretamente relacionada com o desempenho térmico da edificação. De modo geral, quanto melhor o desempenho térmico maior vai ser a eficiência. Mas isso depende de vários fatores, como características dos componentes construtivos, das cargas internas instaladas, do sistema de iluminação, o tipo e a eficiência dos sistemas de climatização, os padrões de uso, entre outros fatores (ABDI, 2017b). Freire e Amorim (2011) salientam que a busca do bom desempenho térmico deve estar diluída nas diversas fases do projeto, partindo da escala macro para escala micro.

De acordo com os mesmos autores, a busca da eficiência energética nas edificações está principalmente no projeto arquitetônico. Contudo, ainda se vê muitas produções arquitetônicas não contemplando questões relacionadas ao desempenho energético. Isso pode indicar uma falta de interesse por parte de muitos arquitetos, ou mesmo desconhecimento para conseguir lidar com todas as condicionantes.

Segundo Laine e Karola (2007), as análises de desempenho energético se baseiam principalmente em estimativas estatísticas ou em cálculos estáticos simples. A principal barreira para um uso mais amplo de métodos de análise dinâmica de energia tem sido a necessidade de inserir de forma manual as informações pertinentes no modelo. O que poderia ser contornado com a utilização do processo BIM, desde que este seja alimentado por um banco de dados com informações pertinentes, como características físicas dos materiais, por exemplo.

Por utilizar um modelo paramétrico, o BIM permite ao projetista visualizar de forma rápida e precisa aspectos já mencionados, como a volumetria, a incidência solar, tipos de materiais, entre outras variáveis. Contudo, isso exige uma abordagem diferente na concepção do projeto, o que requer do arquiteto uma maior qualificação profissional para conseguir lidar de forma correta com todas as ferramentas ao longo do projeto (FREIRE; AMORIM, 2011).

2.1 SIMULAÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A simulação computacional de edificações é, segundo ABDI (2017b, p. 12), “o processo de criar um modelo virtual do edifício em análise a partir de seus componentes”. Ou seja, a partir dela é possível prever com antecedência a quantidade do consumo e custo de energia, estudo de alternativas de soluções energéticas, condições internas, conforto térmico, emissões de CO₂ e a análise de retorno de investimento durante o ciclo de vida da edificação, entre outros.

Freire e Amorim (2011) definem a simulação como uma simplificação da realidade que pode gerar resultados mais ou menos precisos, conforme os parâmetros inseridos. Muitas destas variáveis precisam ser desconsideradas ou, pelo menos simplificadas, com intuito de tornar as simulações exequíveis, devido tanto pela limitação computacional, como para permitir uma melhor compreensão dos resultados. Contudo, os mesmos autores reforçam a importância de testar modelos simplificados, com o objetivo de comparar as diversas alternativas possíveis para auxiliar nas decisões de projeto.

A simulação permite solucionar problemas complexos, possibilitando avaliações abrangentes de opções de projeto, de forma realista. Isso permite aos profissionais a capacidade de analisar uma situação e propor medidas essenciais para melhorar o desempenho de uma edificação a partir de critérios estabelecidos. Como consequência, isso tornará o processo de projeto melhor, mais barato e rápido (CLARKE, 2001).

De acordo com a ABDI (2017b), a aplicação do BIM em simulações de eficiência energética ainda é relativamente recente. O BIM conta com ferramentas integradas e complementares, possibilitando fazer vários tipos de operações em único modelo, facilitando a comunicação entre as diversas disciplinas, melhorando a análise e eliminando erros de manipulação de dados. Isso vai ao encontro com a simulação computacional, que é uma ferramenta multidisciplinar (MOTAWA; CARTER, 2012). Além disso, por possuir uma estrutura TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação) e por apresentar uma geometria, relações espaciais, informações sobre as propriedades dos materiais, entre outras características, o modelo BIM viabiliza a

avaliação do desempenho energético ao longo do ciclo de vida da edificação (FREIRE; AMORIM, 2011).

Segundo Motawa e Carter (2012), a análise de consumo de energia dos edifícios é uma atividade complicada, pois é necessário considerar as diversas interações dentro do edifício, como o sistema AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado), dados climáticos, envidraçamento, sombreamento, radiação solar, ventilação natural, massa térmica e as dinâmicas de funcionamento da edificação. A ABDI (2017b) reforça que é necessário que o projetista tenha alguns conhecimentos básicos, como volumes de controle e conservação de massa, mecanismos de transferência de calor e conhecimentos específicos dos sistemas e estratégias adotadas.

Normalmente, um modelo BIM já conta com algumas das informações supracitadas, que podem ser exportadas para o *software* de simulação. Como saída de informação, pode-se ter, de forma geral, a análise de energia/ térmica, análise de iluminação/ sombreamento e análise de custo. Caso tenha um resultado indesejado, é possível readequar o projeto (MOTAWA; CARTER, 2012).

Como já mencionado anteriormente, as decisões relacionadas as questões de sustentabilidade de edifício são mais eficazes quando aplicadas desde o início do projeto, quando ainda está sendo levado em consideração a volumetria, a implantação e a orientação. Soluções tardias, visando modificar o edifício de forma retroativa, para atender os parâmetros de desempenho, tendem a ser ineficientes e caras. Contudo, muitas vezes as simulações acabam ocorrendo apenas nas fases finais de projeto, com o objetivo de apenas atender normas de desempenho energético, limitando-se em apontar o sucesso ou fracasso de todo o processo, e não para maximizar a eficiência da edificação (LAINE; KAROLA, 2007; ABDI, 2017a).

Atualmente, há, no mercado, vários programas de simulação, com o intuito de tornar mais acessível aos projetistas a atividade de avaliação de desempenho energético. Dentre eles, pode-se citar o EnergyPlus, Ecotect Analysis e o IES Virtual Environment. Porém, conforme Freire e Amorim (2011), essas ferramentas continuam distantes de escritórios de arquitetura, restringindo-se apenas à especialistas. Ainda há muita resistência por parte dos projetistas de utilizá-los, tendo como consequência

a realização de avaliações isoladas – quando realizadas –, sem integração com o projeto e demais questões envolvidas.

Uma das dificuldades encontradas para fazer as simulações de desempenho energético está relacionada à interoperabilidade, seja na falta de padrão de nomenclaturas dos componentes construtivos, na incompatibilidade de formatos de arquivos, ou na falta de integração entre simulações (FREIRE; AMORIM, 2011). Durante o processo de exportação do arquivo para a simulação (seja no formato proprietário ou no formato IFC) acaba ocorrendo, algumas vezes, a perda, ou não reconhecimento, de informações, sendo necessária a reconfiguração do modelo (OLIVEIRA; SCHEER; TAVARES, 2016).

Como forma de contornar os problemas relacionados à interoperabilidade, algumas empresas estão buscando formas de interação entre os diferentes programas BIM. Uma solução que está sendo bastante utilizada é a XML (*eXtensible Markup Language*), uma extensão do HTML. Dentre as estruturas desenvolvidas há o gbXML (*Green Building XML*), que consegue transferir informações necessárias, sem perda de dados, para análises preliminares. Segundo a ABDI (2017b), tem se tornando um padrão para a interoperabilidade entre programas BIM e de simulação energética.

Destaca-se ainda que a transferência de informações de uma ferramenta de modelagem BIM para um de simulação energética é unidirecional. Apesar dos dados do projeto poderem ser exportados facilmente através da extensão IFC e gbXML, o processo no sentido contrário apresenta algumas dificuldades. Se houver alguma necessidade de modificar o modelo para adequar o projeto, a configuração será manual (FERRARI *et al.*⁴, 2008, *apud* MOTAWA; CARTER, 2012).

Outra limitação encontrada se refere às informações climáticas. Segundo Freire e Amorim (2011), a maior parte do território brasileiro carece de um levantamento sistemático de dados climáticos. Motawa e Carter (2012) complementam que as análises energéticas dependem de valores estimados de

⁴ FERRARI, P.; SILVA, N.; LIMA, E. Building information modeling and interoperability with environmental simulation systems. **Innovations and advances in computer sciences and engineering**. Dordrecht, n. 1, p. 579-583, 2008.

cargas, fluxo de ar e transferência de calor, o que pode resultar em estimativas não confiáveis.

Além disso, outra dificuldade presente na simulação se refere ao acesso às informações sobre dados de propriedades térmicas de materiais construtivos. A maioria dos fabricantes não disponibilizam esse tipo de informação. De acordo com Freire e Amorim (2011), a situação ideal seria que os fornecedores disponibilizassem seus catálogos em um formato neutro, com livre acesso. Isso permitiria uma simulação mais detalhada e com informações mais consistentes.

A simulação de desempenho energético pode ser realizado em vários níveis de complexidade e nas diversas fases do projeto. Dentre as estratégias adotadas, podem ser consideradas as análises de incidência solar, análises termoenergéticas e análises de ventilação natural, como poderão vistas a seguir.

2.1.1 Análise de incidência solar

A simulação de incidência solar, de modo geral, avalia o uso da iluminação natural no interior do edifício. Esse tipo de iluminação auxilia na redução da utilização de luz artificial, diminuindo assim a geração de calor interno e o gasto de energia. Além disso, a utilização de luz natural permite uma conexão com o exterior, melhorando a qualidade do espaço, no que se refere na produtividade e saúde dos usuários (KRYGIEL; NIES, 2008).

De acordo com SANTOS (2012), ao analisar incidência solar, é necessário ter conhecimento sobre alguns conceitos, como:

- Conforto visual: condição em que o ser humano consegue visualizar adequadamente os objetos com o máximo de precisão visual exigido pela tarefa, com o mínimo de esforço. O desconforto visual pode causar cansaço, queda de rendimento e problemas de saúde. Para a avaliar o conforto são avaliados os níveis de iluminância, equilíbrio de luminâncias e controle de ofuscamento;
- Sistemas de iluminação natural: se referem aos sistemas de abertura, que permitem e controlam a entrada de luz natural, direta ou difusa. Basicamente,

vai levar em consideração o tamanho e posição das aberturas, o tipo de vidro e os elementos de sombreamento;

- Disponibilidade de luz natural: refere-se a disponibilidade de luz natural que varia conforme o horário, o dia do ano, a latitude e a quantidade e tipo de nuvens, de névoa ou poeira suspensa na atmosfera. Pode ser classificado como céu claro, céu parcialmente encoberto ou céu encoberto;
- Indicadores do uso de luz natural: tem como objetivo medir, geralmente quantitativamente, a iluminação do ambiente. Entre os indicadores podem ser citados o fator de luz diurna (FLD), coeficiente de luz diurna (CLD), potencial de aproveitamento da luz natural (PALN), autonomia da luz diurna (ALD) e a iluminância útil da luz natural (IULN).

Krygiel e Nies (2008) complementam que um projeto de iluminação natural eficaz depende principalmente da orientação, construção e dimensionamento da envoltória do edifício. Uma vez feito isso, é possível ter uma otimização dos recursos energéticos da edificação.

A maioria dos programas que trabalham com geometria são precisos e de fácil visualização e compreensão (FREIRE; AMORIM, 2011). Isso permite ao arquiteto, em várias etapas de projeto, uma avaliação rápida do potencial ganho solar através das fachadas, auxiliando-o nas decisões quanto ao posicionamento, dimensionamento e configuração das aberturas, levando em conta o tipo de uso. Além disso, é possível verificar o impacto do edifício sobre o entorno, e vice-versa, no que se refere ao sombreamento. Apesar da facilidade, de modo geral, essas ferramentas ainda são subutilizadas, segundo os mesmos autores.

Contudo, Santos (2012) salienta que a maioria dos programas de visualização de modelos arquitetônicos não produzem resultados matematicamente precisos. Apesar de gerar imagens fotorrealistas, eles não conseguem prever a qualidade e a quantidade de luz no espaço. Os únicos capazes são os que possuem algoritmos que trabalham com radiosidade e com o método do raio traçado (*ray-tracing*).

Entre os programas de análise de iluminação, gratuitos ou pagos, podem ser citados: AGI 32, Daylight, Daysim, Dialux, Ecotect, Radiance, Lightscape e Relux Vision. Os seus principais dados de entrada são a latitude do local, geometria do

ambiente, posição e orientação das aberturas, transmissão luminosa dos elementos translúcidos e a refletância das superfícies (SANTOS, 2012).

2.1.2 Análise termoenergética

A análise termoenergética avalia o consumo energético de uma edificação, principalmente a partir da eficiência térmica. Conforme Krygiel e Nies (2008), é levado em consideração basicamente o consumo dos sistemas de iluminação artificial e sistemas mecanizados de climatização.

A partir de alguns fatores ambientais e de características da construção, é possível prever as demandas de energia da mesma. A partir disso é possível dimensionar o sistema AVAC e definir os materiais, (quanto às propriedades térmicas) que compõem o prédio, principalmente na sua envoltória, além do posicionamento e dimensionamento das aberturas para o exterior.

Ainda que seja importante ter um modelo bem construído para ter uma simulação bem-sucedida, não é necessário definir todos os materiais, pelo menos não em estágios iniciais do projeto. O que permite uma maior flexibilidade de concepção. Segundo Krygiel e Nies (2008), ao exportar o modelo BIM para o programa de simulação, deve-se ter no mínimo dados da localização do projeto, a modelagem da envoltória e a definição dos ambientes que serão testados.

Apesar de apresentar informações importantes para o desempenho térmico do edifício, os programas de simulação termoenergética não são tão precisos e nem de fácil compreensão se comparado aos aplicativos de análise de incidência solar (FREIRE; AMORIM, 2011). É necessário a inserção de dados climáticos locais e informações das propriedades térmicas dos materiais e dos componentes construtivos utilizados, sendo que ambos nem sempre estão disponíveis, ou possuem um fácil acesso a eles. Além do mais, segundo os autores, a maioria dos resultados são apresentados apenas em forma de tabelas ou gráficos, o que pode representar um fator de resistência por parte dos projetistas.

Além disso, de acordo com Krygiel e Nies (2008), a análise exige um nível de conhecimento mais elevado para conseguir entender completamente a dinâmica do desempenho térmico, de modo a compreender como os diferentes sistemas e cargas

podem impactar uns aos outros e afetar o edifício como um todo. Contudo, os autores complementam que os resultados das simulações não devem ser encarados de forma rígida, sendo o mais importante entender a razão que gerou os resultados.

Dentre os programas de análise térmica, podem ser elencados o Design Builder, DOE-2, Ecotect, Energyplus, ESP-r e o Visualdoe. Já as principais informações a ser inseridas na simulação são a modelagem, características físicas e térmicas dos materiais, tipo de atividades a serem realizadas no espaço em questão, horário de ocupação, informações as características dos sistemas de climatização e iluminação, geração de calor a partir de equipamentos e pessoas dentro ambiente e os dados climáticos do local nas diversas épocas do ano (SANTOS, 2012).

2.1.3 Análise de ventilação natural

A ventilação é definida, segundo Matezuki e Cheng (2009), como o processo de suprir e remover o ar por meios naturais ou mecânicos para um espaço qualquer. A ventilação natural oferece várias vantagens, como a renovação do ar interior da edificação, que melhora a qualidade do ar interno e auxilia no conforto térmico.

A simulação de ventilação natural possui algumas semelhanças com a de desempenho térmico. Além de necessitar de um conhecimento mais aprofundado, ainda carece de métodos de trabalho compatíveis com o processo de concepção projetual, no que tange na influência de tomadas de decisões de projeto. Devido à complexidade desse tipo análise, na maioria das vezes, acabam sendo consideradas apenas as direções predominantes dos ventos, que podem influenciar no posicionamento e dimensionamento das aberturas (FREIRE; AMORIM, 2011).

Entre as abordagens de simulação de ventilação podem ser apontados o modelo *AirFlowNetwork* (AFN) e o modelo *Computational Fluids Dynamics* (CFD). Segundo Amaral e Assis (2016), o sistema AFN consiste em um modelo nodal, onde fluxo de ar entre os nós é calculado por meio da diferença de pressão entre eles. A partir disso, pode-se calcular dados como pressão, fluxo de ar, temperatura, umidade, e as trocas de calor latente e sensível.

Já o modelo CFD é baseado na "discretização do volume da edificação em subvolumes, em pequenos subvolumes, onde são solucionadas para cada vértice as equações de Navier-Stokes, (...) para assim derivar os campos de velocidade do ar e temperatura" (AMARAL; ASSIS, 2016, p. 770). O CFD é considerado a técnica mais complexa e demorada, porém a mais flexível. Devido ao alto nível de detalhamento e exigência computacional, ele é utilizado principalmente para testar comportamentos térmicos de um edifício em condições extremas. Isso acaba se tornando uma limitação, uma vez que seria necessário entender como um edifício se comporta o ano inteiro.

3. PROJETO GENERATIVO

Com o avanço dos sistemas de computação, tem sido permitido novas formas de abordagens em relação ao projeto. Em um primeiro instante, teve-se a criação do sistema CAD (*Computer Aided Design*) que permitiu um processo projetual mais rápido e preciso, em comparação ao método anterior. Contudo, ele se restringe basicamente na forma de representação. Nos últimos anos, tem surgido novas ferramentas que, além de facilitar na geração da documentação, tem tido um papel importante na concepção arquitetônica. Esse tipo de projeto, com auxílio computacional gráfico no processo criativo, conforme Natividade (2010), tem-se denominado de arquitetura digital.

Devido à grande quantidade de informações que precisam ser analisadas durante o processo de projeto, e às diversas alternativas que podem ser investigadas, o projetista necessita de meios para assimilar tudo isso. Nesse caso, a computação gráfica permite uma visualização geral do projeto e fornece ferramentas que contribuem na solução dos problemas (FERNANDES; PEREIRA; ISHIDA, 2006).

Na arquitetura digital, “o processo conceptivo se dá através de padrões descritivos e a articulação destes padrões em novas entidades a serem utilizados por um computador” (NATIVIDADE, 2010, p. 35). As formas não são concebidas de forma tradicional, a partir de estruturas bem definidas, mas sim, derivadas de operações que são somente possíveis a partir do processamento computacional.

Para que isso seja possível, parte-se da utilização de estratégias paramétricas, os quais permitem customizar parcial ou completamente o edifício. Segundo Umakoshi (2014), essa é uma ferramenta poderosa para a solução de problemas de alta complexidade e com um grande número de soluções possíveis.

Em projetos que adotam a parametrização, é possível ter um controle integral, a partir da manipulação de parâmetros, de todos os elementos pertencentes à edificação. De acordo com Oliveira, Scheer e Tavares (2015), o projeto paramétrico pode ser compreendido como o uso de parâmetros e relações para a formação de uma forma. Isso pode ser feito ao longo do processo de projeto, o que permite uma maior flexibilidade ao projetista (SILVA JR, 2016).

Os parâmetros podem ser definidos como regras ou requisitos que devem ser satisfeitos no projeto, que podem estar relacionados a questões financeiras, espaciais, sociais ou técnicas, como conforto térmico (KOLAREVIC *et al.*, 2004). Isso permite ao projetista manipular os parâmetros até conseguir encontrar a solução que atenda todas as diretrizes preestabelecidas, desde o início da concepção do projeto. Neste caso, o mais importante é saber como definir, determinar e reconfigurar o modelo (NATIVIDADE, 2010).

Apesar de ser inerente ao processo arquitetônico, a definição e manipulação desses parâmetros sempre foram dificultados pelos meios de representação. A partir da utilização de ferramentas paramétricas é possível, de forma precisa, visualizar e interagir em tempo real com todos os elementos da edificação, e assim, conseguir tomar decisões para alcançar a melhor solução. Segundo Silva Jr (2016), o processo BIM tem desempenhado um papel importante para a difusão desse sistema.

Um avanço em relação ao projeto paramétrico, e uma ferramenta importante na arquitetura digital, tem sido o projeto generativo. Este integra as bases da parametrização com a utilização de algoritmos para solução de problemas (BIANCA, 2017). Apesar de ser um conceito antigo, esse tem ganhado força com o desenvolvimento computacional. De acordo com Celani, Vaz e Pupo (2013), o sistema generativo é um método indireto de projeto, onde objetivo não é a solução de um problema específico, mas sim a criação de um grupo de definições que permitem resolver problemas semelhantes, em diversos contextos.

O projeto generativo pode ser compreendido como um método automático de produção de formas, gerado com base em um conjunto de regras e diretrizes calculados de forma computacional. Diferente de outras de formas de abordagem de projeto, o arquiteto não interage de forma direta com o objeto, mas sim com esse sistema. O foco acaba se tornando em “encontrar a forma” e “não produzir a forma” (BROD; BORDA; PIRES, 2012).

O sistema generativo auxilia o arquiteto no processo de concepção de projeto, uma vez que esse permite a criação de inúmeras possibilidades de soluções projetuais, a partir de um mesmo mecanismo. Cabe ao arquiteto apenas conseguir filtrar as soluções pertinentes, e saber quais regras ou elementos devem adicionados, ou retirados, para obter novos resultados para serem avaliados. A sua limitação é

basicamente a capacidade computacional de gerenciar todos os parâmetros envolvidos (SILVA JR, 2016). Contudo, Umakoshi (2014) salienta que se deve manter um senso crítico em relação aos resultados, para que não se torne apenas um exercício de *software*. As soluções de projeto através do design computacional não podem ser realizadas de forma aleatória, devem ser conferidas pelo arquiteto, e este terá o aval para decidir o que vai ser realizado.

Conforme Celani, Vaz e Pupo (2013), o projeto generativo pode ser utilizado em três situações distintas:

- Otimização: quando se tem um problema de projeto com critérios bem definidos, porém, não há uma forma direta para encontrar a solução. Nesse caso, é necessário testar todas as possibilidades com objetivo de encontrar a solução que atenda todos os critérios exigidos;
- Geração de famílias de objetos: quando é preciso ter uma grande quantidade de soluções similares, mas apresentando pequenas diferenças, como a criação de peças pré-fabricadas para a construção;
- Exploração: quando os critérios de solução de projeto não estão bem definidos, sendo necessário buscar diferentes possibilidades, de modo avaliar os prós e contras de cada uma.

Assim, o sistema generativo pode trabalhar tanto de forma convergente, buscando a melhor solução dentro de um conjunto de possibilidades, a partir de critérios preestabelecidos; quanto de forma divergente, buscando uma solução original para um problema, por meio da geração múltiplas alternativas (SILVA JR, 2016).

Conforme o objetivo, pode-se dividir o projeto generativo em grupos, segundo alguns critérios, como: método de modelagem, possibilidade de automação, nível de controle que o usuário tem sobre o projeto, determinística, possibilidade de identificação de formas emergentes, espaço de busca e objetividade dos procedimentos de avaliação geralmente utilizados (CELANI, VAZ E PUPO, 2013).

De acordo com Oxman (2006), o projeto generativo, dentro da arquitetura digital, pode ser separado em um duas subcategorias: gramática da forma e modelos evolutivos – foco desta monografia. A primeira permite a geração de formas por meio de regras transformacionais, e a segunda por algoritmos evolutivos.

3.1 GRAMÁTICA DA FORMA

O modelo generativo no design digital é caracterizado pelo fornecimento de mecanismos e sistemas computacionais para o processo de geração de formas, a partir de regras, relações e diretrizes. Para que o projetista possa utilizar a técnica generativa, é necessário um módulo interativo que forneça um controle e opções de escolhas, para que o mesmo possa se guiar para selecionar as soluções desejadas. Nesse caso, os princípios da gramática da forma permitem esse controle. De acordo com Oxman (2006), a gramática da forma tem um papel importante como ferramenta para a concepção de projetos da arquitetura digital.

A gramática da forma teve o seu desenvolvimento a iniciado a partir da década 70 por Gorge Stiny e James Gips a qual foi baseada no sistema de produção do matemático de Emil Post e na gramática generativa do linguista Noam Chomsky. Posteriormente, foi desenvolvido um sistema similar, o qual era baseado em formas geométricas e transformações euclidianas, no lugar de símbolos matemáticos e substituição de caracteres. Inicialmente, ela tinha a finalidade de servir como um sistema de geração de formas para a pintura e a escultura (CELANI *et al*, 2006).

Conforme Natividade (2010), a gramática da forma pode ser definida como um sistema de criação de formas baseado em regras. Ela é um sistema gerador de linguagens, capaz de definir de forma finita e precisa uma linguagem potencialmente infinita. Ou seja, ela determina que apenas algumas combinações sejam válidas dentro de um conjunto de elementos (MORAES, 2016).

O conceito de utilizar regras e princípios para a definição de formas e espaços está presente na arquitetura há vários séculos. De acordo com Ferrão e Eloy (2014), a arquitetura sempre esteve associada a diretrizes orientadoras, em diferentes tipologias e estilos arquitetônicos, como as edificações da Era Clássica.

A gramática da forma é composta por um conjunto finito de elementos gráficos (2D e 3D), como linhas, planos ou volumes. A partir destes, são feitas operações de adição e subtração; transformações espaciais como rotação, espelhamento, deslocamento; e geração de composições formais como proporções, simetrias e assimetrias. Esse sistema trata as formas como entidades não atômicas, ou seja, elas podem ser decompostas e recompostas livremente pelo projetista (KNIGHT, 2000).

Segundo Mitchell⁵ (1977, *apud* NATIVIDADE, 2010), o projeto arquitetônico é um caso especial de solução de problemas, onde é permitido representar as condicionantes como sistemas. Ou seja, a solução dos problemas pode ser caracterizada como um processo de busca dentro de um conjunto de soluções possíveis, na qual é pode-se avaliar cada alternativa e escolher a que melhor atende os critérios preestabelecidos. Isso vai de encontro com os princípios da gramática da forma, os quais não partem de premissas fixas, mas sim na tentativa de descobrir novas soluções ao longo processo, em conjunto com sistemas computacionais.

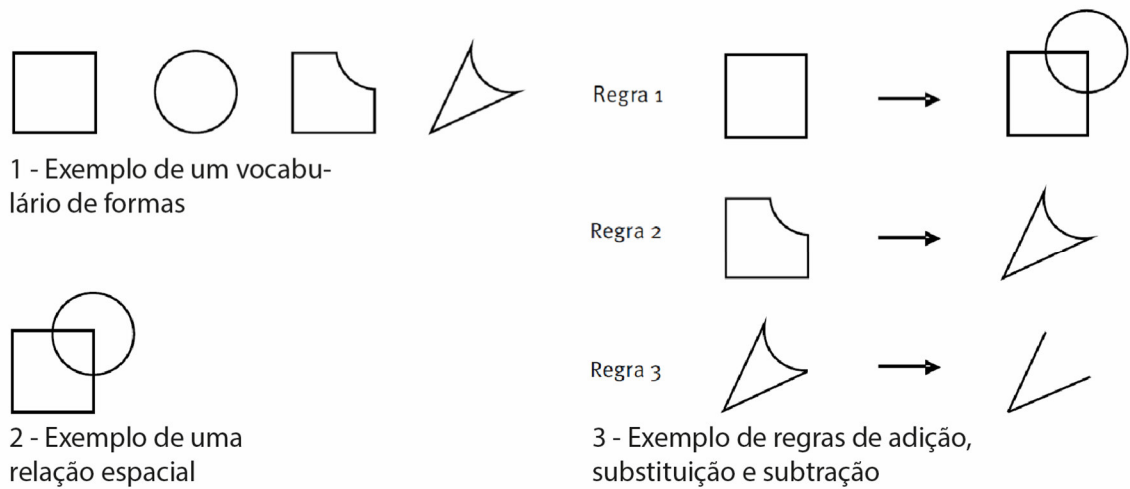
A gramática da forma permite reconhecer e operar formas que não são predefinidas em uma gramática, mas que podem ser geradas a partir de qualquer parte das formas criadas por meio de regras. Assim, os projetistas podem ter várias maneiras de aplicar o sistema, em diversas etapas do projeto (KNIGHT, 2000).

De acordo com Celani *et al*, (2006), a gramática da forma é desenvolvida a partir da definição dos seguintes elementos (Figura 2):

1. Vocabulário: é um conjunto finito de formas primitivas que farão parte da gramática, podendo ser elementos bi ou tridimensionais;
2. Relações espaciais: conjunto de combinações espaciais desejadas entre os elementos vocabulário;
3. Regras: modo como os elementos do vocabulário serão transformados, a partir de operações lógicas booleanas e transformações matemáticas e geométricas;
4. Forma inicial: para aplicar as regras, é necessário escolher uma forma inicial pertencente ao vocabulário.

⁵ MITCHELL, W. **Computer-Aided Architectural Design**. Nova York: Van Nostrand-Reinhold Company, 1977.

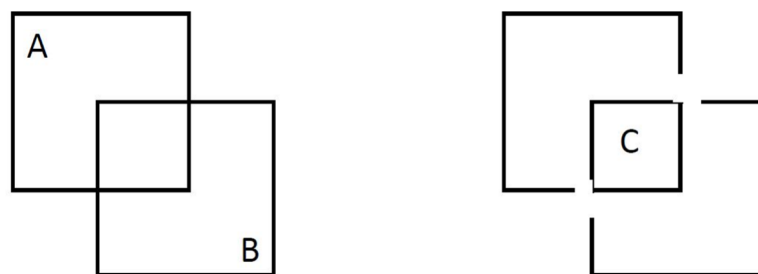
Figura 2 - Elementos da gramática da forma



Fonte: Celani *et al* (2006, adaptado pelo autor).

Uma vez feito isso, dá-se o início as interações, aplicando de forma sucessivas as regras sobre a forma inicial, até conseguir obter a composição desejada. Segundo os mesmos autores, a maior dificuldade na implementação computacional de gramáticas da forma é conseguir identificar figuras emergentes – subformas geradas a partir da combinação de outras formas. Conforme a Figura 3, tem-se como exemplo a sobreposição de dois quadrados (A e B), que resulta em um quadrado menor C. Este quadrado emergente pode ser facilmente identificado pelo cérebro humano, porém, do ponto de vista computacional, são necessárias técnicas avançadas de inteligência artificial para conseguir identificá-la. Isso ocorre porque, para o modelo computacional, os dois quadrados maiores continuam sendo entidades independentes, o que impede aplicar regras de substituição ao quadrado C, uma vez que os vértices deste não foram definidos inicialmente.

Figura 3 - Sobreposição dos quadrados A e B e emergência do quadrado C



Fonte: Celani *et al* (2006).

Além de ser utilizada na geração de formas arquitetônicas, a gramática da forma pode ter uma aplicação analítica. A gramática analítica tem como objetivo o “estudo da estrutura do desenho, por meio de utilização de um raciocínio gráfico de análise, constituindo-se em um método de representação formal do estilo, pela determinação de constantes que originam as regras dessa gramática” (MORAES, 2016, p. 38). Isso pode ser feito tanto por meio de simulações de estratégias possíveis para a geração do edifício existente, quanto pela derivação de exemplares possíveis da mesma linguagem ou estilo.

3.2 ALGORITMOS EVOLUTIVOS

O sistema generativo permite gerar todas as soluções possíveis para um determinado problema mal definido – procedimento denominado como geração exaustiva. Contudo, é necessário ter um procedimento de avaliação eficiente dos resultados obtidos, principalmente quando há um número grande de opções. Para isso, é preciso ter, pelo menos, alguns critérios para conseguir filtrar as soluções satisfatórias (CELANI, VAZ e PUPO, 2013).

Contudo, mesmo quando são utilizados critérios objetivos, ao testar todas as possibilidades pode-se ter um consumo de tempo muito alto, tornando o procedimento inviável. Uma estratégia alternativa para isso seria gerar apenas as respostas que são passíveis de ser pelo menos satisfatórias, baseado em experiências anteriores ou em regras gerais. Denominado como geração heurística, essa abordagem consegue produzir um número menor de soluções, se comparada à geração exaustiva, mas, em contrapartida, há a chance de que muitas possibilidades criativas não sejam levadas em consideração. Para contornar isso, é selecionado um número menor de alternativas, e estas são testadas, para que suas informações sejam cruzadas entre si e, assim, obter melhores resultados. Esse filtro é o conceito utilizado pelos algoritmos evolutivos.

Algoritmos “são procedimento para endereçar problemas através da série finita, consistente e racional de passos, e que são decodificadas através de *scripts*, formando regras lógicas executadas por sistemas computacionais” (NATIVIDADE, 2010, p. 128). Eles podem ser utilizados tanto para resolver problema conhecidos,

quanto para solucionar problemas parcialmente conhecidos por meio de composições randômicas.

A sua utilização na arquitetura permite produzir, de forma eficiente, repetições diferenciadas na modelagem digital, exigindo um esforço e tempo de trabalho menor. Um projeto que adota uma estratégia algorítmica é considerado, segundo o mesmo autor, como um problema a ser solucionado. Assim, a arquitetura surge a partir de um conjunto de operações lógicas. Por possuir a capacidade de deduzir informações a partir da busca e da extração de padrões e princípios de organização, os algoritmos permitem apresentar uma alta quantidade de soluções possíveis para um problema projetual.

Devido à capacidade de processamento de um computador, os algoritmos podem gerar soluções inovadoras, que muitas vezes estão além da capacidade humana de imaginação, uma vez que consegue testar todas as combinações possíveis, em um intervalo de tempo extramente menor. É uma ferramenta eficiente para resolver problemas complexos, tornando-se um grande complemento para o raciocínio do projetista durante a concepção projetual (NATIVIDADE, 2010).

Os algoritmos evolutivos (ou genéticos) são algoritmos de busca baseados nos conceitos da genética e da seleção natural. Assim como na teoria da evolução de Darwin, onde cada geração de uma espécie é um aprimoramento da anterior em termos de adaptação ao ambiente, em projetos que utilizam algoritmos, há uma combinação consecutiva da sobrevivência dos melhores indivíduos (resultados) com uma forma estruturada de informação entre dois indivíduos para formar uma estrutura heurística de busca. Assim, cada geração é estrutural melhor que a anterior (LINDEN, 2012).

Conforme Martino (2015), a utilização de algoritmos evolutivos é um dos métodos mais utilizados para a otimização de edificações. É possível gerar soluções que resolvem simultaneamente, e de forma satisfatória, diversas variáveis. Contudo, como é algo em que está em constante desenvolvimento, ainda há barreiras na aplicação de estratégias de usabilidade, flexibilidade e eficiência, o que reduz a propagação desse tipo de técnica, salienta o autor. Além disso, os algoritmos genéticos possuem a tendência de criar bons resultados, mas não necessariamente vai apresentar o melhor. É possível haver pequenas variações de resultados entre as

mesmas simulações, devido a parcela de aleatoriedade presente no processo. Por isso, é importante que os operadores de seleção sejam bem definidos.

Os principais componentes que constituem um sistema de algoritmos genéticos, segundo Martino (2015), são:

- **Representação:** é a definição de como os elementos que caracterizam um determinado indivíduo ou soluções são representados ou codificados. De modo geral, é a variação dos parâmetros de um ou mais elementos. A escolha inadequada pode gerar resultados insatisfatórios, pois, ao serem aplicados os operadores de diversidade, serão criados resultados ineficazes;
- **População inicial:** de forma aleatória, são escolhidos os indivíduos que compõem a primeira geração. A partir deles serão criados os indivíduos das gerações seguintes, por meio de cruzamento de informações. Para cada geração é mantido o mais apto, e o restante são substituídos. Como é feito de forma de aleatória, é recomendável que o número de elementos na primeira geração seja alto, para que possa ter uma maior quantidade de amostra para comparação;
- **Operadores de diversidade:** são responsáveis por gerar a diversidade nas populações, contribuindo para exploração do espaço de soluções – são o maior diferencial no método evolutivo. Isso pode ser feito por meio de mutação ou recombinação dos indivíduos;
- **Operador de avaliação e seleção:** é o modo como são selecionados os indivíduos que apresentam os melhores resultados (os mais aptos) para passar para a próxima geração. Para fazer a avaliação, é utilizado a função *fitness*, que verifica o quanto cada um dos indivíduos atende às condições e restrições definidas como as desejadas para a obtenção de uma solução. Isso é expresso em um valor numérico, que quanto maior (ou menor, dependendo do caso) mais apto está o indivíduo;
- **Duração:** é o tempo necessário para que os operadores de diversidade, de avaliação e de seleção possam cumprir o seu papel em busca das melhores soluções. Isso ocorre de forma gradual, permitindo um processo gradativo de ajustes entre as soluções. Podem ser definidas três maneiras de duração: determinação de tempo máximo de processamento computacional, de número de gerações ou por atendimento aos objetivos desejados.

4. METODOLOGIA

Conforme descrito anteriormente, o objetivo do trabalho é aplicar o processo generativo a partir da modelagem e otimização, quanto a eficiência energética, da envoltória de um edifício comercial (fictício). Para isso foram utilizados uma série de *softwares*, que mantiveram um nível de interoperabilidade entre si, para realizar a simulação (Figura 4). A definição desses programas e suas funções estão descritas a seguir:

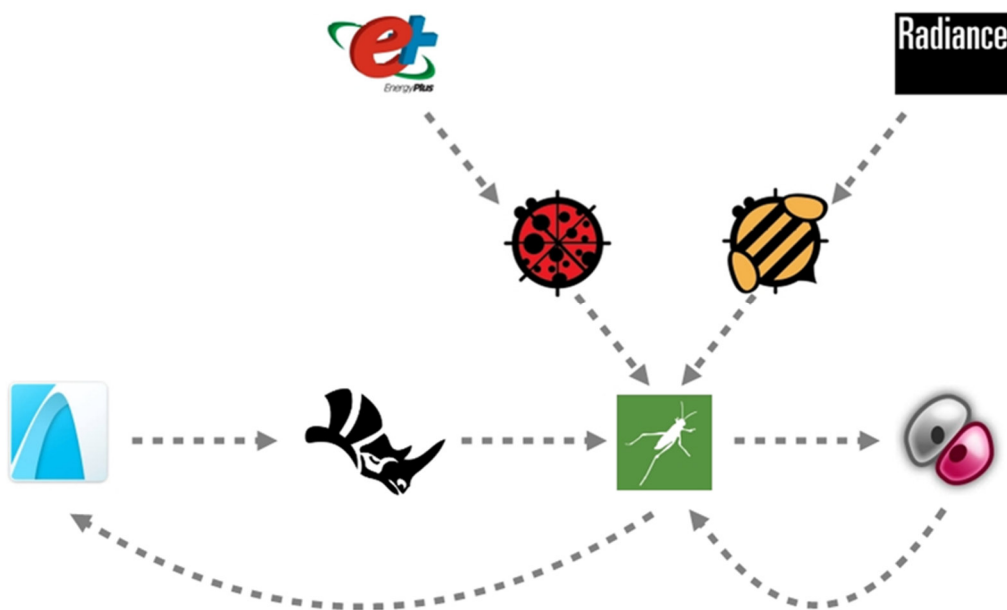
- ARCHICAD 22: *software* BIM focado em projetos de arquitetura. É responsável pela modelagem da edificação e classificação dos elementos que a compõe. Para manter a interoperabilidade com os demais softwares foi utilizado um *plug-in* do próprio programa denominado *Grasshopper - ARCHICAD Live Connection*, que disponibiliza ferramentas de modelagem que permite uma troca de informações de forma bidirecional;
- Rhinoceros 6: é um *software* de modelagem tridimensional baseado na tecnologia NURBS⁶. É responsável pela modelagem da envoltória, por meio da integração com o Grasshopper;
- Grasshopper: é um *plug-in* do Rhinoceros, de programação visual, que possibilita automatizar várias tarefas que permitem personalizar o fluxo de trabalho, de forma a facilitar a análise de soluções. Além da modelagem das fachadas, ele é também o que permite a integração entre os demais softwares;
- EnergyPlus: é um programa gratuito de simulação de consumo de energia em edificações. Possibilita várias configurações de materiais, de sistemas AVACs e definições de ambientes. É responsável por simular o consumo de energia elétrica dos sistemas mecânicos de aquecimento e resfriamento da edificação;
- Radiance: é também um programa gratuito, de código aberto, que disponibiliza ferramentas de análise e visualização de iluminação. É responsável por fazer as simulações de iluminação natural da edificação;
- Honeybee e Ladybug: são *plug-ins* gratuitos do Grasshopper, responsáveis por fazer a integração com o EnergyPlus e o Radiance. Eles oferecem

⁶ Nurbs (*Non-Uniform Rational Bsplines*) é um modelo matemático utilizado na computação gráfica para gerar e representar curvas e superfícies (NATIVIDADE, 2010).

diversas ferramentas de configuração, modelagem, análise e representação de informações das simulações;

- Galápagos: é um solucionador evolutivo do Grasshopper, que se baseia em algoritmos evolutivos, conforme descrito no capítulo anterior. É responsável por testar as diversas variações dos parâmetros da envoltória da edificação e encontrar a solução que possua uma melhor eficiência energética, com base nas simulações realizadas.

Figura 4 - Fluxo de trabalho



Fonte: Autor (2019).

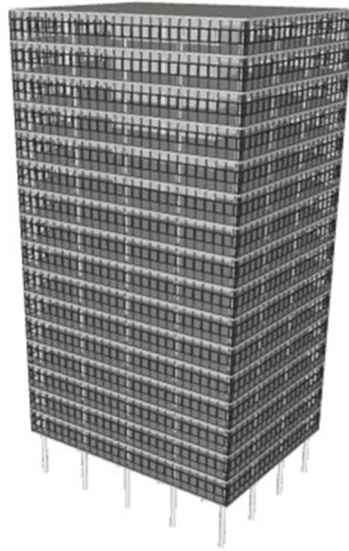
4.1 MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO

Para este trabalho, foi modelado no ARCHICAD um edifício comercial hipotético, conforme a Figura 5. A edificação conta com 18 andares destinados aos escritórios, possuindo dimensões externas de 26 metros de comprimento por 20 metros de largura e um pé esquerdo (altura de piso a piso) de 3,20 metros.

Basicamente, cada pavimento é dividido em dois ambientes distintos: o núcleo e o ambiente de trabalho (Figura 6). O primeiro, com dimensões de 12 x 6 metros, é onde estão concentradas as áreas de apoio, como banheiros e salas técnicas, e as circulações verticais. Já o segundo, é a área de trabalho propriamente dita na qual

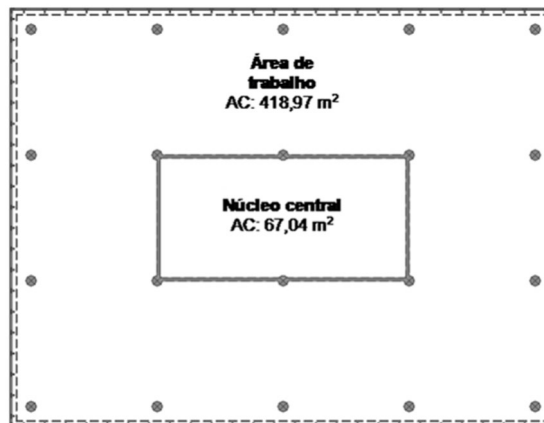
são realizadas as simulações, possuindo uma planta livre com um pé direito de 2,50 metros de altura.

Figura 5 - Perspectiva



Fonte: Autor (2019).

Figura 6 - Planta



Fonte: Autor (2019).

A localização do edifício foi setada para a cidade de Curitiba. Apesar de não possuir um local de implantação definido, a posição do norte foi orientada a 90° em relação ao sentido longitudinal do prédio. Desse modo, é possível presumir, com uma maior facilidade, um possível posicionamento dos elementos de sombreamento e, assim, verificar se está coerente o resultado gerado pela otimização.

Os materiais utilizados na edificação são os materiais padrões do próprio ARCHICAD, os quais já contam com especificações e propriedades físicas dos

mesmos. Para os elementos estruturais foi utilizado concreto armado, as paredes internas são de alvenaria (rebocada e emassada), as vedações externas são paredes cortinas de vidro e o forro rebaixado é de gesso acartonado. Além disso, esses elementos foram classificados como interno ou externo. Essa definição é importante para indicar se eles vão permitir trocas de calor dos ambientes com o entorno, ou não (adiabáticos).

Por fim, foi criada uma zona (ferramenta do programa) para cada ambiente e uma terceira englobando o pavimento inteiro. Esse recurso é necessário para definir a volumetria e as características de uso do espaço em que serão feitas as simulações.

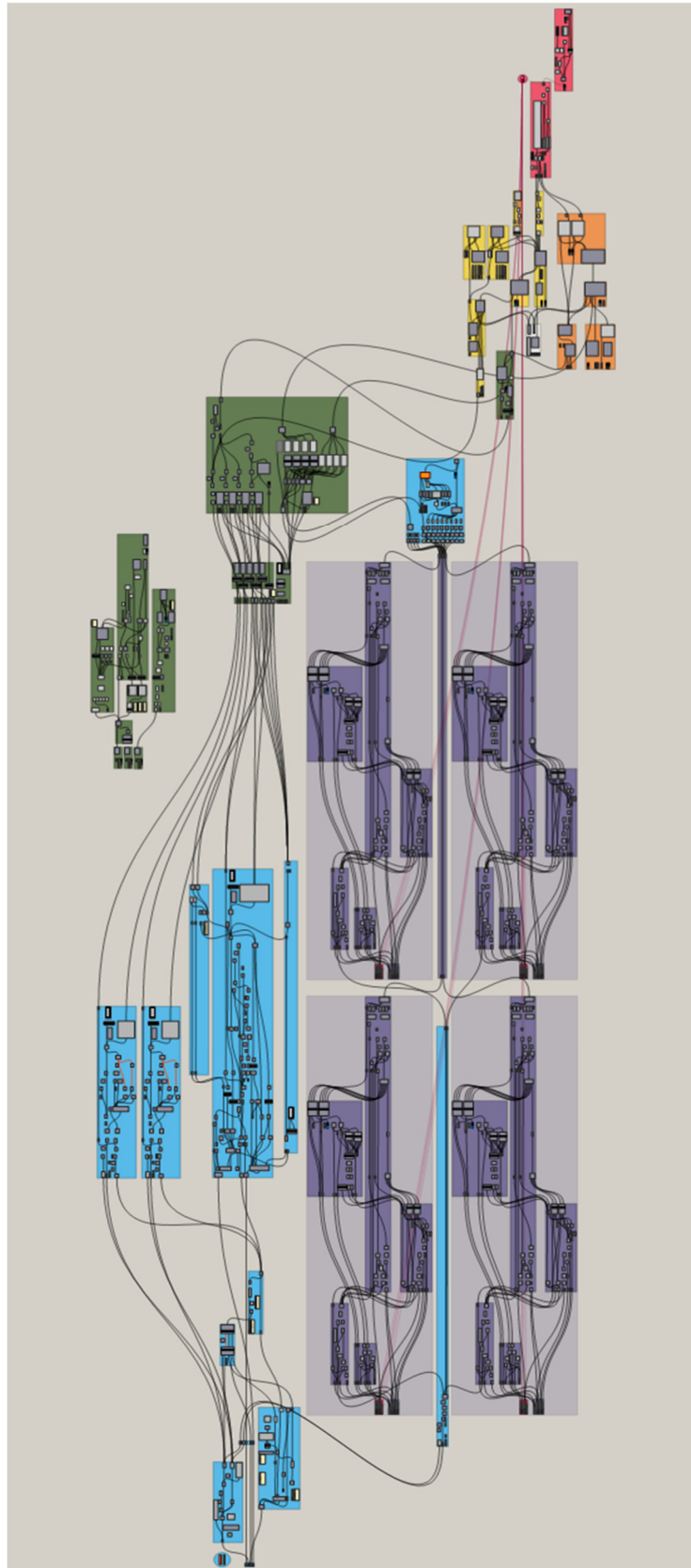
4.2 DESENVOLVIMENTO DA ROTINA ALGORÍTMICA

A maior parte do trabalho prático foi desenvolvida em uma rotina do Grasshopper, incluindo a modelagem da envoltória, as simulações e a otimização. Conforme a Figura 7, a rotina foi dividida nas seguintes partes:

- Azul: integração bidirecional com o modelo 3D do ARCHICAD. Responsável por fazer o reconhecimento da geometria da edificação e por retornar ao modelo a nova envoltória;
- Roxo: é a modelagem dos elementos sombreadores para cada fachada. Neste conjunto de baterias⁷ constam os parâmetros geométricos que serão testados para a otimização;
- Verde: reconhece os materiais vindos do ARCHICAD e os adéquam para a linguagem do Grasshopper;
- Branco: definição da localização e dos dados climáticos;
- Amarelo: simulações relacionadas ao conforto lumínico;
- Laranja: simulações relacionadas ao conforto térmico, mais especificamente ao consumo de energia dos sistemas de climatização;
- Magenta: conjunto de baterias que dão suporte ao Galápagos, para fazer a otimização.

⁷ Baterias são representações visuais das ferramentas do Grasshopper. Por meio de entradas e saídas de dados, essas baterias são interligadas para automatizar fluxos de trabalho, de modo a desempenhar funções geométricas, matemáticas ou analíticas (N. do autor).

Figura 7 - Rotina no Grasshopper

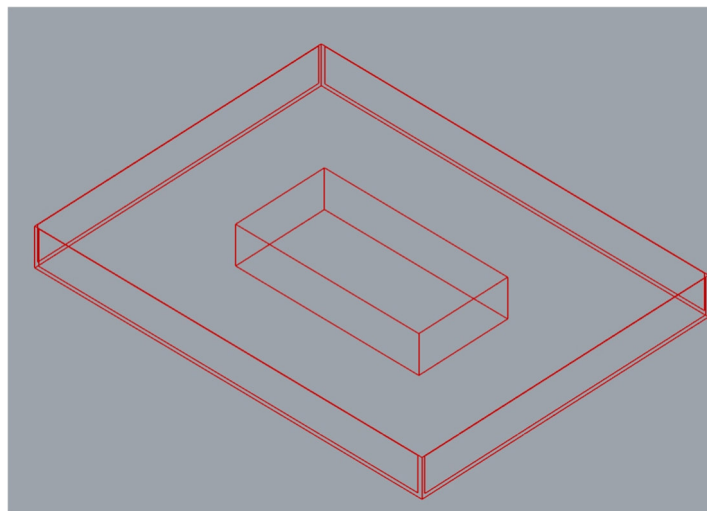


Fonte: Autor (2019).

O primeiro passo para fazer a rotina foi fazer o reconhecimento da edificação. Para isso, foi utilizado o *plug-in Grasshopper - ARCHICAD Live Connection* para fazer a importação do modelo. Devido à complexidade da geometria, quanto a quantidade de superfícies, é necessário simplificar o modelo dentro Grasshopper, com o objetivo de não sobrecarregar o *software* e o computador.

Como todos os pavimentos são semelhantes, foi filtrado apenas um andar – o primeiro, nesse caso. Além disso, para as simulações, não é necessário ter as espessuras dos elementos representados geometricamente, basta apenas ter a informação numérica. Assim, foram importadas as zonas do ARCHICAD, que são prismas simples, com os quais é possível representar o piso, as paredes e forro por meio de suas superfícies (Figura 8).

Figura 8 - Definição da zona



Fonte: Autor (2019).

Contudo, ao fazer isso, perde-se o vínculo das informações das vedações com a geometria da zona. Para refazer esse vínculo, é necessário criar uma lista⁸ que leva em consideração a posição das vedações e das superfícies das zonas, de modo a encontrar as coordenadas semelhantes. Vale ressaltar que, uma vez feito isso na rotina, todo processo é automatizado, independente do modelo, desde que todos elementos vindos do ARCHICAD estejam nos vegetais (*Layers*) corretos e com suas classificações correspondentes.

⁸ Todos elementos dentro do Grasshopper pertencem a pelo menos uma lista. As diferentes listas de dados são organizadas em uma estrutura de árvore de dados, na qual cada ramificação e conteúdo de dados possui um número de índice. Conforme o índice, o objeto terá uma forma de interação diferente com os demais elementos (N. do autor).

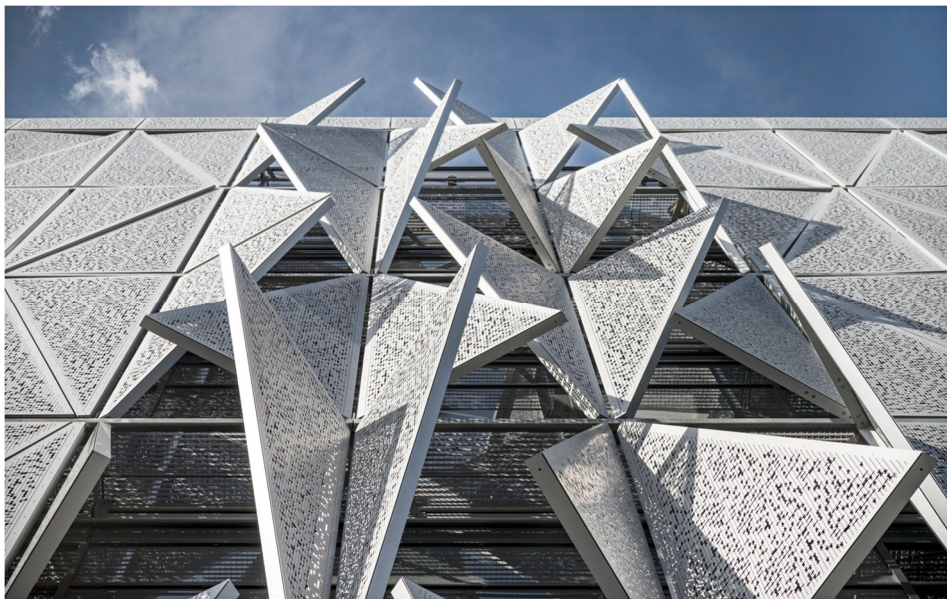
O passo seguinte foi modelar os elementos sombreadores. Utilizou-se como inspiração a edificação da sede da Thyssenkrupp AG, em Essen, Alemanha (Figura 9), e um dos edifícios do campus da University Southern Denmark, em Kolding, Dinamarca (Figura 10), projetos dos escritórios JSWD Architekten + Chaix & Morel et Associés e Henning Larsen Architects, respectivamente.

Figura 9 - Sede da Thyssenkrupp AG



Fonte: JSWD Architekten (2014).

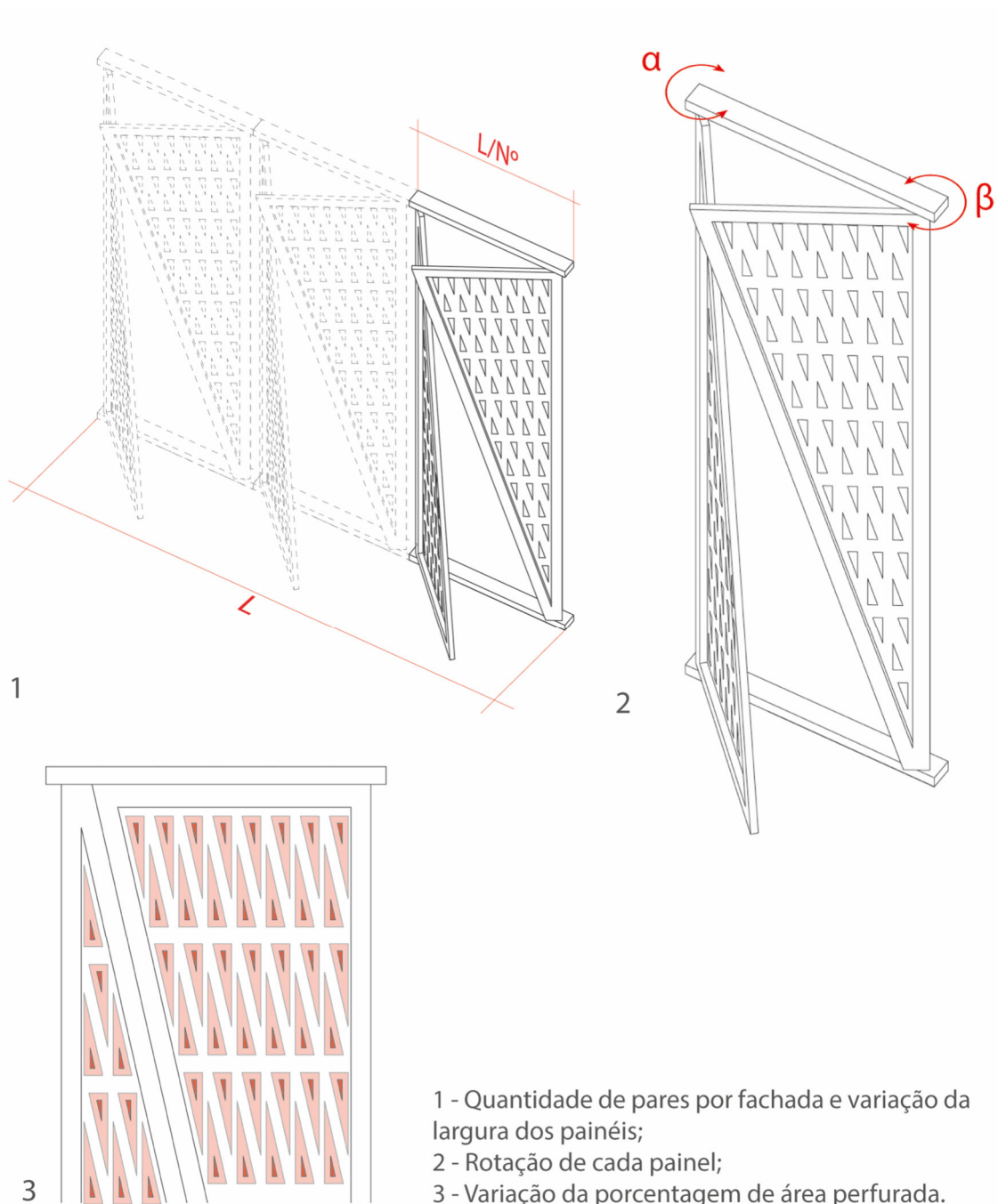
Figura 10 - Edifício do campus da University Southern Denmark



Fonte: Henning Larsen Architects (2014).

A envoltória consiste em pares de painéis triangulares perfurados que se abrem no eixo vertical. Basicamente, há quatro parâmetros, para cada fachada, que são levados em consideração na otimização (Figura 11): a quantidade de pares por fachada, o que, conseqüentemente, altera a largura dos painéis; os ângulos de abertura, independentes, dos triângulos de cada par; e a porcentagem de abertura das perfurações.

Figura 11 - Parâmetros da envoltória



Uma vez otimizada, a modelagem desses elementos é exportada para o modelo original, no ARCHICAD. Assim como foi necessário simplificar a modelagem da edificação, o mesmo foi feito com a nova envoltória. Para as simulações, foram utilizadas superfícies simples, representando apenas os painéis, e porcentagens de transparência para indicar a taxa de permeabilidade. Quando exportado, é carregado o modelo completo, com espessura, suportes e os furos.

Com toda a modelagem (simplificada) realizada, são definidos os materiais das vedações. Um dos problemas encontrados na elaboração da rotina foi a impossibilidade de fazer, de forma automática, a identificação dos parâmetros físicos dos materiais dentro do Grasshopper. O *plug-in* de comunicação com o ARCHICAD, até o momento de elaboração desta monografia, é bem limitado na questão de fornecimento de informações dos elementos.

Para contornar isso, foram feitos mapas no ARCHICAD com os dados necessários, conforme as Tabela 1 Tabela 2 Tabela 3. Os parâmetros utilizados para as simulações térmicas são: espessura (m), condutividade térmica (W/m.K), densidade (Kg/m³), calor específico (J/Kg.K). Já para as simulações de conforto lumínico, para este caso, basta o código RGB da cor das superfícies, para medir a refletância das mesmas. Com as tabelas geradas, elas são exportadas em formato XLS e importadas no Grasshopper. A partir disso, são vinculados os parâmetros aos materiais para cada vedação.

Tabela 1 - Características dos materiais

Composições	Nome	Espessura da camada	Condutividade Térmica	Densidade	Capacidade de Calor
-	Concreto armado - estrutural	0,2	2,50 W/mK	2400 kg/m ³	1000 J/kgK
-	Gesso - placa	0,02	0,25 W/mK	900 kg/m ³	1000 J/kgK
Alvenaria 100, Reboc. 2 Faces	Reboco	0,02	0,57 W/mK	1300 kg/m ³	1000 J/kgK
Alvenaria 100, Reboc. 2 Faces	Tijolo - Cerâmico	0,1	0,12 W/mK	648 kg/m ³	920 J/kgK
Alvenaria 100, Reboc. 2 Faces	Reboco	0,02	0,57 W/mK	1300 kg/m ³	1000 J/kgK

Fonte: Autor (2019).

Tabela 2 - Características dos materiais da parede cortina

Composições	Nome	Espessura montante	Espessura painel	Condutividade Térmica	Densidade	Capacidade de Calor
-	Alumínio	0,15	-	160 W/mK	2800 kg/m ³	880 J/kgK
-	Vidro	-	0,01	1W/mK	2500 kg/m ³	750 J/kgK
-	Alumínio	-	0,01	160 W/mK	2800 kg/m ³	880 J/kgK

Fonte: Autor (2019).

Tabela 3 - Código das cores das superfícies

Nome da superfície	Cor de superfície (R, G, B)
Pintura – Branco Acetinado	255, 255, 255
Concreto - 01	168, 169, 158
Concreto - 02	168, 169, 158
Gesso	255, 255, 255
Estuque – Branco Suave	243, 245, 239
Tijolo - Cerâmico	244, 122, 0
Pintura - Antracite	46, 46, 46
Vidro - Cristal	240, 247, 243
Metal Alumínio	234, 225, 225

Fonte: Autor (2019).

Com as modelagens e os materiais definidos, é possível criar as zonas de simulações na rotina. As zonas são responsáveis por indicar qual espaço será levado em consideração para os testes, além de definir as características e as formas de utilização destes ambientes. Apesar das simulações serem feitas em um único ambiente (área de trabalho), a rotina foi desenvolvida de modo que cada zona tem influência sobre as demais.

Para a definição das características do clima, foi utilizado o arquivo climático de Curitiba, em arquivo EPW, disponível em: <https://www.energyplus.net/weather-download/south_america_wmo_region_3/BRA//BRA_Curitiba-Afonso.Pen.838400_SWERA/all>. O período de análise de simulação abrange o ano inteiro, de segunda a sexta, dentro do horário comercial (9:00 às 18:00).

Para avaliar a eficiência energética gerada pela otimização da envoltória, foi utilizado como referência o conforto lumínico e térmico. Quanto mais bem iluminado o local (sem ofuscamento), mais visualmente confortável é o ambiente, e menos

necessário é a utilização de iluminação artificial. De modo geral, isso é proporcional à quantidade de aberturas nas fachadas. Contudo, ao aumentar a área de janelas, tem-se um aumento na incidência de radiação solar dentro do ambiente, o que resulta no aumento da temperatura interna, gerando desconforto principalmente no verão. Já no inverno, há uma perda de calor para o exterior, devido às pontes de calor geradas pelas aberturas. Como consequência, há um maior consumo de energia dos sistemas de climatização, para manter o local em uma faixa de temperatura confortável. Assim, a otimização busca encontrar o equilíbrio entre a utilização de iluminação natural e o uso de ar-condicionado, de modo a consumir a menor quantidade de energia possível.

Para isso, avaliou-se o consumo de energia, por metro quadrado, gerado pela climatização artificial, de modo a manter a temperatura ambiente entre 20° C e 25° C. Além dos dados climáticos, foi considerada também a geração de calor interna originada pela iluminação artificial (7W/m²), pelos usuários do local (0,5 pessoas/m²) e pelos equipamentos (10W/m²). Quanto às características do sistema de ar-condicionado, foi utilizado o modelo padrão fornecido pelo EnergyPlus.

Para as simulações de iluminação natural, foram empregadas as medidas Autonomia da Luz Diurna (ALD) e Iluminância Útil da Luz Natural (IULN). A ALD é expressa como uma porcentagem das horas do ano trabalhado que atingem ou ultrapassam a iluminância de referência, no caso, 500 Lux – mínimo exigido para escritórios, conforme a NBR ISO 8995. A IULN, indica a porcentagem das horas do ano em que a denominada iluminância útil é alcançada. São consideradas iluminâncias úteis aquelas que estão no intervalo de 100 Lux e 2000 Lux (SANTOS, 2012). Apesar de atender a norma, a ALD desconsidera as luminâncias mais baixas, que ainda auxiliam na iluminação geral do ambiente. Assim a IULN ajuda a complementá-la.

Em ambas situações, foi criado, no Grasshopper, um plano horizontal de análise a 80 cm de altura, com sensores espaçados em 1 x 1 m. Além disso, as simulações foram configuradas para uma qualidade baixa, com o intuito agilizar o processo, uma vez que elas são realizadas diversas vezes até conseguir atingir o resultado pretendido.

Vale ressaltar que não foi levado em conta a ventilação natural. Essa opção se deve ao fato de que esse tipo de simulação necessita de uma análise mais

aprofundada, devido a sua complexidade. Além disso, não foi encontrada uma forma eficiente de integrar um software de simulação de ventilação natural com o Grasshopper, o que tornou inviável a sua utilização.

Para a otimização foi utilizado o Galápagos. Para tal função, ele necessita testar a variação dos parâmetros dos elementos de sombreamento, conforme comentado anteriormente, e encontrar a combinação que apresente o maior *fitness*, ou seja, que apresente o melhor resultado possível, dentro das condições colocadas. Para encontrar o *fitness*, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$Fitness = (((ALD - ALDR) / ALDR) * 100) - (((Cons - ConsR) / ConsR) * 100) + (ALD + IULN - (Cons * RC))$$

Onde:

- ALD é a Autonomia da Luz Diurna medida com os elementos de sombreamento;
- ALDR é a Autonomia da Luz Diurna medida sem os elementos de sombreamento;
- IULN é a Iluminância Útil da Luz Natural medida com os elementos de sombreamento;
- Cons é o consumo de energia do sistema de climatização (W/m²) com os elementos de sombreamento;
- ConsR é o consumo de energia do sistema de climatização (W/m²) sem os elementos de sombreamento;
- RC é o coeficiente de relevância do consumo, ou seja, se for maior que 1, a otimização vai priorizar a redução do consumo de energia do sistema de ar-condicionado, se menor que 1, será priorizada uma maior quantidade de iluminação natural.

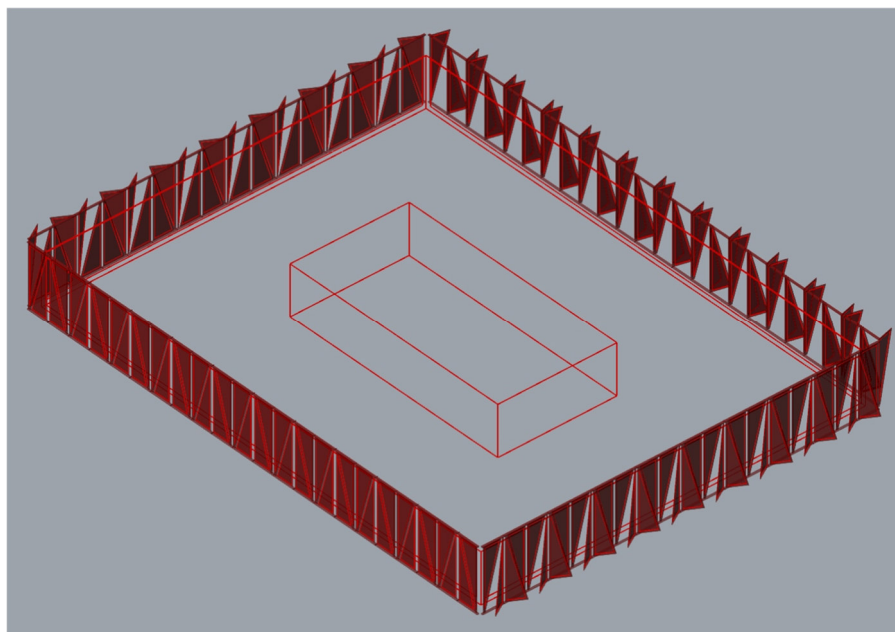
De modo geral, quanto maior for o ALD e o IULN, mais alto será o *fitness*, e quanto menor o Cons, mais alto também será o resultado. O ALDR e o ConsR foram calculados como 86,50% e 155,04 KW/m²/ano, respectivamente. Já o RC foi definido como 1,1. Além disso, o Galápagos foi configurado para gerar 15 indivíduos por geração, sendo que a primeira conta 45 indivíduos.

5. RESULTADOS

O processo de otimização no Grasshopper durou cerca de 19 horas e ao todo foram criadas 32 gerações de indivíduos (conjunto de parâmetros). Esse tempo longo se deve ao fato da necessidade de fazer um conjunto de simulações para cada mudança de parâmetros. Isso também é influenciado pela capacidade de processamento do computador utilizado. Como resultado final, atingiu-se um *fitness* de -19,73.

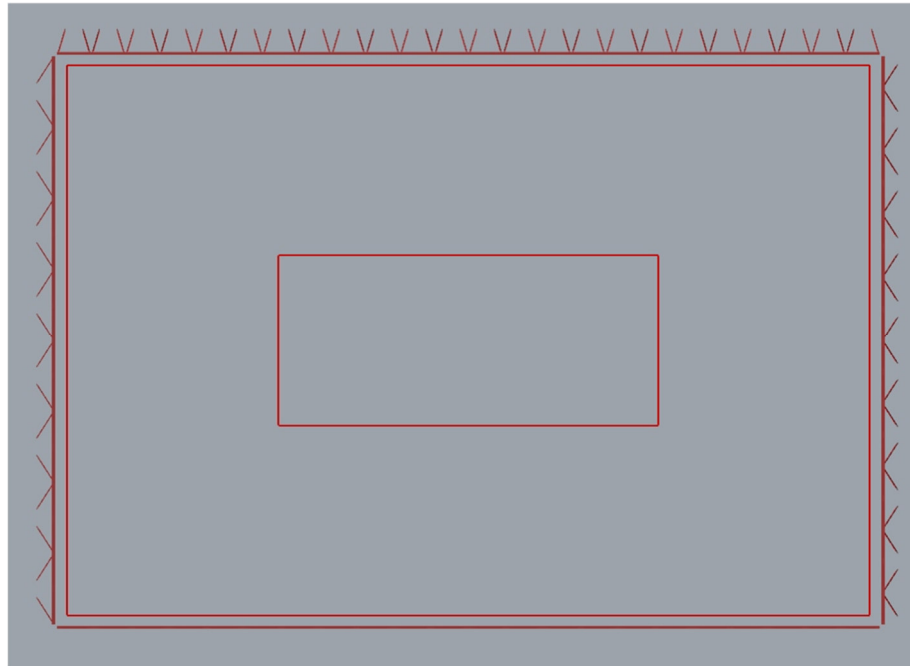
Quanto a envoltória, obteve-se padrões diferentes de elementos sombreadores entre as fachadas. A proporção de aberturas ficou dentro do que era esperado, levando em conta a orientação solar. Conforme poder ser visto nas figuras Figura 12 e Figura 13, na fachada Norte, que recebe diretamente raios solares por mais tempo durante o dia, os sombreadores ficaram organizados de modo a obstruir mais a passagem de luz. Em contrapartida, no lado Sul esses elementos ficaram mais abertos, uma vez que há uma maior entrada de luz difusa. Já nas fachadas Leste e Oeste, teve-se uma proporção de abertura intermediária. Na Tabela 4, é possível verificar, de forma mais detalhada, a configuração final dos sombreadores de cada lado da edificação.

Figura 12 - Perspectiva dos elementos sombreadores



Fonte: Autor (2019).

Figura 13 - Planta dos elementos sombreadores



Fonte: Autor (2019).

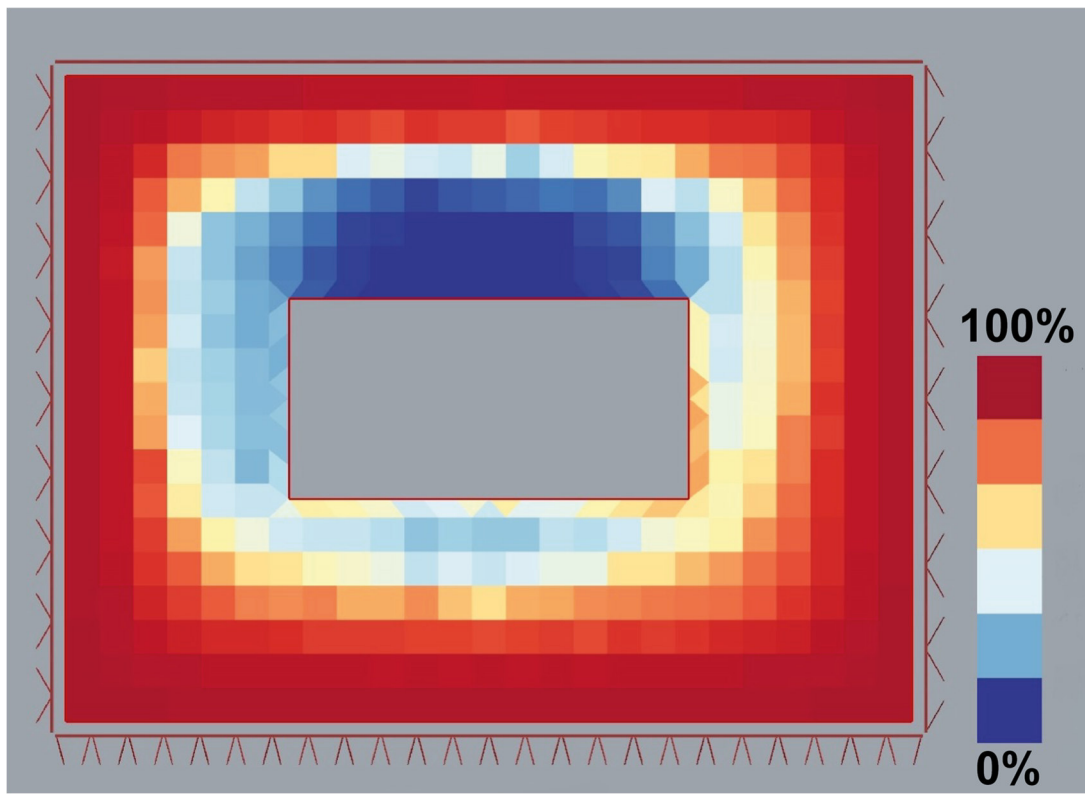
Tabela 4 - Parâmetros finais

Fachada	Ângulo α	Ângulo β	Quantidade de pares	Porcentagem de abertura dos furos
Norte	0°	0°	22	40%
Oeste	0°	30°	16	40%
Leste	30°	0°	18	40%
Sul	75°	75°	24	60%

Fonte: Autor (2019).

Na Figura 14, tem-se o resultado da simulação da Luz Diurna Anual (ALD). Em média, na área onde foram realizadas as simulações, foi atingido uma iluminância igual ou superior a 500 lux durante 66,16% do tempo de intervalo de testes (9:00 às 18:00). Essa proporção é menor se comparada a ALD medida no projeto padrão (sem a utilização da envoltória), que teve 86,50%. Contudo, não houve um grande prejuízo, pois, em ambos os casos, seria necessário o auxílio da iluminação artificial para manter a iluminação em níveis mínimos e adequados para um ambiente de escritório.

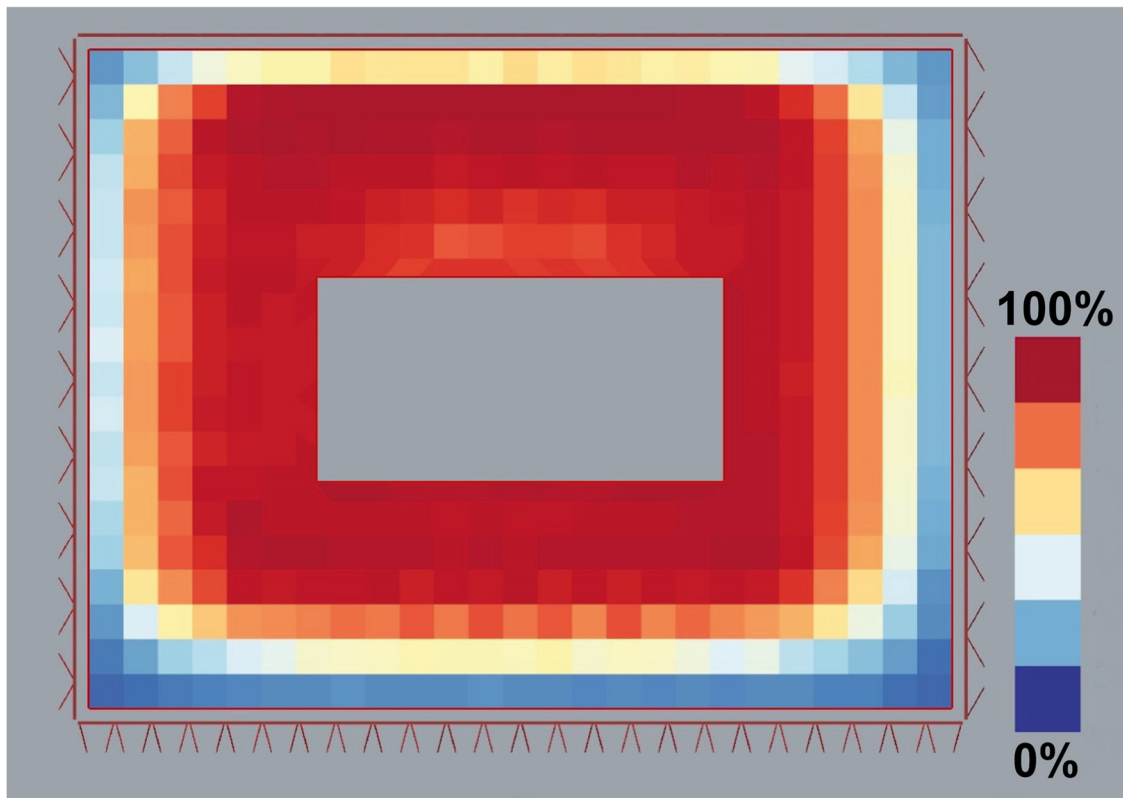
Figura 14 - Luz Diurna Anual (ALD).



Fonte: Autor (2019).

Quanto à simulação de Iluminância Útil da Luz Natural (IULN), teve-se uma proporção de 47,22%, em média, conforme a Figura 15. Percebe-se uma distribuição relativamente uniforme ao longo do ambiente, proporcionada pela otimização, tendo uma maior diferença nas áreas próximas às janelas, onde se atinge uma iluminância superior a 2000 lux durante a maior parte do dia. Já no teste ALD, essa uniformidade é vista apenas nos lados Leste, Oeste e Sul. No lado Norte, teve-se uma maior prioridade, por parte do processo de otimização, na redução de entrada de luz natural com o intuito de diminuir os níveis radiação solar dentro do ambiente.

Figura 15 - Iluminância Útil da Luz Natural (IULN)

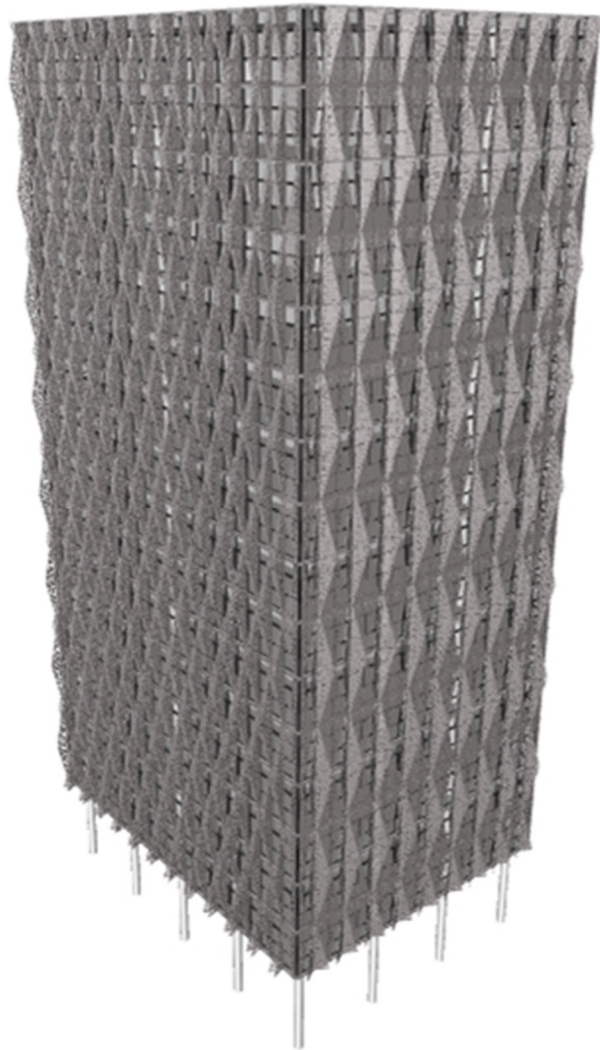


Fonte: Autor (2019).

Na simulação de conforto térmico, obteve-se como o resultado o consumo energético médio de 120,15 Kwh/m² durante um ano – 39,59KWh/m²/ano para os sistemas de aquecimento e 80,56KWh/m²/ano para os sistemas de resfriamento. Se comparado ao projeto padrão, que atingiu um consumo de 155,04KWh/m²/ano, houve uma diminuição de 22,50% no gasto de energia – uma redução considerável.

Após realizada a otimização, a modelagem da envoltória é enviada, completamente, para o modelo da edificação, no ARCHICAD. Os sombreadores são exportados como morph (ferramenta do ARCHICAD), e transformados em objetos dentro do mesmo programa, com intuito de deixar o arquivo mais leve. Uma vez feito isso, a envoltória é replicada para os demais pavimentos (Conf. Figura 16).

Figura 16 - Modelo Final



Fonte: Autor (2019)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de sistemas computacionais permite novas formas de abordagens em relação ao projeto, principalmente por meio de ferramentas inovadoras. Com o processo BIM, é possível ter uma quantidade maior de informações de um projeto, as quais possibilitam prever potenciais problemas projetuais e, assim, solucioná-las de forma antecipada. Ao adotar o projeto generativo, abre-se um novo conjunto de possibilidades de soluções, os quais são só possíveis, ou viabilizados, com o auxílio computacional. Uma aplicação importante dessa metodologia de projeto, tem sido relacionada às questões de sustentabilidade, que é uma demanda cada vez mais requisitada no setor da construção civil.

Conforme demonstrado no capítulo anterior, ao aplicar o processo de otimização, a partir do projeto generativo, obteve-se uma redução no consumo de energia dos sistemas de climatização artificial, no exemplo adotado. Apesar de ter sido utilizado uma solução relativamente simples, quanto ao aspecto formal, atingiu-se uma redução de 22% de energia com a utilização dos elementos sombreadores propostos. Além disso, conseguiu-se manter um nível de interoperabilidade bidirecional entre os *softwares* utilizados, conforme objetivo inicial. Isso é importante em um fluxo de trabalho, por evitar retrabalhos ao adequar o projeto conforme os resultados das simulações.

Vale ressaltar que apesar do processo de projeto generativo permitir propor novas soluções com uma maior facilidade, o papel do arquiteto ainda é importante. É necessário reforçar que, no caso das simulações, é importante que os projetistas possuam conhecimento sobre o comportamento da iluminação solar e os conceitos de conforto ambiental. Nas etapas iniciais da elaboração da rotina algorítmica no Grasshopper, foram testadas outras soluções de sombreadores os quais apresentaram resultados bastante diferentes. Apesar de o Galápagos conseguir fazer a otimização, ele se baseia nos parâmetros definidos pelo projetista. Assim, é preciso que o profissional saiba quais parâmetros definir, para obter melhores resultados, e ter um senso crítico sobre as soluções encontradas.

Uma desvantagem que pode ser apontada nesse processo de projeto é a questão de tempo demandado para fazer as otimizações. No trabalho realizado, o processo das simulações levou cerca 19 horas para ser realizado, o que pode ser um

empecilho no fluxo de trabalho. O resultado obtido, apesar de atender a requisitos de sustentabilidade, pode ainda não atender outras condicionantes do projeto, necessitando novas baterias de testes.

Caso o tempo não seja um fator determinante, pode-se adicionar outros parâmetros levando em consideração outros fatores, ou até mesmo propor soluções com níveis complexidade maior, quanto ao aspecto formal. Além disso, é possível fragmentar a otimização em etapas, obtendo níveis diferentes de refinamento durante o processo de projeto. Por exemplo, em uma fase mais inicial, pode-se otimizar a volumetria da edificação, levando em consideração a radiação solar e os elementos no entorno do sítio, como as sombras geradas pelas edificações vizinhas.

Além disso, neste trabalho, os elementos sombreadores foram otimizados para atender o ano inteiro com uma única disposição. É possível fazer a simulação para diferentes épocas do ano, com intuito de criar uma fachada dinâmica, de modo a obter melhores resultados.

Conforme visto anteriormente, apesar de ter obtido uma redução de energia de climatização, no resultado da simulação da Luz Diurna Anual (ALD) houve uma redução na porcentagem de tempo em que há iluminância mínima para o tipo de ambiente, o que demandaria, teoricamente, uma maior utilização de iluminação artificial. Para um trabalho futuro, isso pode ser levado em consideração no cálculo de consumo de energia, para obter o real de ganho de economia na edificação com o processo de otimização.

Ainda para um trabalho futuro, poder ser verificado uma forma de considerar o uso da ventilação natural, tanto na questão de como seria trabalhado em conjunto com a simulação de conforto térmico, quanto como seria feito a interoperabilidade com os programas utilizados. Conforme mencionado anteriormente, não foi possível levar em consideração esse recurso (ventilação natural), o qual tem uma influência importante para este tipo de situação.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Guia 1 – Processo de projeto BIM**. Brasília, 2017a. (Coletânea guias BIM ABDI-MDIC).

_____. **Guia 5 – Avaliação de desempenho energético em projetos BIM**. Brasília, 2017b. (Coletânea guias BIM ABDI-MDIC).

AMARAL, D. O.; ASSIS, E. S., Ventilação natural de edifícios: revisão crítica da normalização e das metodologias de predição. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

BIANCA, R. Do Projeto Paramétrico ao Projeto Generativo – Parte 1: O que é projeto generativo. **Mundo AEC** (Autodesk), 19 Janeiro 2017. Disponível em: <<https://blogs.autodesk.com/mundoaec/projeto-generativo-parte-1/>>. Acesso em: 9/6/2019.

BROD, G. A.; BORDA, A.; PIRES, J. F. Um ensaio para inserção do conceito de processos generativos digitais em estágios iniciais da formação em arquitetura. In: XVI Congresso de la Sociedade Ibero-americana de Gráfica Digital, 2012, Fortaleza – CE. SIGraDi 2012 – Forma-In-Formação. **Anais...** Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2012. p. 611-614.

CELANI, G.; CYPRIANO, D.; GODOI, G.; VAZ, C. E. V. A gramática da forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura. **Conexão – Comunicação e Cultura** (UCS), Caxias do Sul, v. 5, n. 10, 182-196, 2006.

CELANI, G.; VAZ, C. E. V.; PUPO, R. Sistemas generativos de projeto: classificação e reflexão sob o ponto de vista da representação e dos meios de produção. **Revista Brasileira de Expressão Gráfica** (UFSC), Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 22-39, 2013.

CLARKE, J. A. **Energy simulation in building design**. 2 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Aspectos da construção sustentável no Brasil e promoção de políticas públicas**. São Paulo, 2014.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook**. A guide to Building Information Modeling for owners, managers designers, engineers, and contractors. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

FERNANDES, B. R.; PEREIRA, A. C. T.; ISHIDA, A. Os três momentos do uso da tecnologia computacional gráfica em arquitetura. **Oculum Ensaio** (PUC-Campinas), Campinas, n.20, p. 36-49, 2006.

FERRÃO, J., ELOY, S. As Gramáticas da Forma no Processo de Criação Arquitetônica. As Gramáticas Originais e o Desenho do Espaço. In: SEMINÁRIO

INTERNACIONAL ARQUITETURAS DO MAR, DA TERRA E DO AR, VOLUME CIDADES DESEJADAS E SONHADAS, IDEIAS DO AMANHÃ, 3., 2014, Lisboa. **Anais...** Lisboa: FAUL: Lisboa, 2014.

FREIRE, M. R.; AMORIM, A. L. Abordagem BIM como contribuição para a eficiência energética no ambiente construído. In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 5., 2011, Salvador. **Anais...** Salvador: UFBA, 2011.

KOLAREVIC, B. *et al.* **Performative architecture: beyond instrumentality.** 1 ed. Abingdon: Taylor & Francis e-Library, 2004.

KNIGHT, T. **Shape Grammars in education and practice: history and prospects.** Cambridge: MIT, 2000. Disponível em: <<http://www.mit.edu/~tknight/IJDC>>. Acesso em: 16/6/2019.

KRYGIEL, E.; NIES, B. **Green BIM: Successful sustainable design with Building Information Modeling.** Indianapolis: Wiley Publishing, 2018.

HENNING LARSEN. **University of Southern Denmark – Campus Kolding.** 2014. Disponível em: <<https://henninglarsen.com/en/projects/featured/0942-sdu-campus-kolding/>>. Acesso em: 14/7/2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 52000-1:2017.** Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/65601.html>>. Acesso em: 26/05/2019.

JSWD. **Thyssenkrupp Quartier.** 2014. Disponível em: <<https://www.jswd-architekten.de/projekte/thyssenkrupp-quartier/>>. Acesso em: 14/7/2019.

LAINE, T., KAROLA, A. Benefits of Building Information Models in energy analysis. In: REHVA WORLD CONGRESS, 9., 2007, Helsinki. **Anais...** Helsinki: FINVAC, 2007.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos.** 3 ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012.

MARTINO, J. A. Algoritmos evolutivos como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura. 310 f. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

MASS, B. H.; SCHEER, S.; TAVARES, S. F. O uso do BIM para o projeto sustentável. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRuíDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

MATTANA, L.; LEBRELOTTO, L. I. Contribuição do BIM para a sustentabilidade econômica de edificações. **Mix Sustentável** (UFSC), Florianópolis, v. 3, n. 20, p. 135-147, 2017.

MARTINS, B. F. B. **Utilização de BIM e métodos de sustentabilidade em elementos na construção.** 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto, 2018.

MATEZUKI, F. K.; CHENG, L. **Análise computacional da ventilação natural em habitação**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2009.

MORAES, R. A. **ABC da arquitetura** – fundamentos conceituais para uma gramática de projeto. 183 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MOTAWA, I.; CARTER, K. Sustainable BIM-based evaluation of buildings. In: IPMA WORD CONFRESS, 26., 2012, Creta. **Anais...** Amsterdam: IPMA, 2012.

NATIVIDADE, V. G. **Fraturas metodológicas nas arquiteturas digitais**. 302 F. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

OLIVEIRA, E.; SCHEER, S.; TAVARES, S. F. Avaliação de impactos ambientais pré-operacionais em projetos de edificações e a modelagem da informação da construção. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 7., 2015, Recife. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2015.

OXMAN, R. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, Grã-Bretanha, n. 27, p. 229-265, 2006.

SANTOS, L. S. **Requisitos de iluminação natural nos sistemas de avaliação de edifícios e impactos energéticos em edificações comerciais no Brasil**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

SILVA JR, F. A. **O uso de sistemas generativos como instrumento de desenho urbano sustentável**. 307 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

UMAKOSHI, E. M. **Avaliação de desempenho ambiental e arquitetura paramétrica generativa para o projeto do edifício alto**. 253 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.