



**PGDESIGN** | Programa de Pós-Graduação  
Mestrado | Doutorado



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**FACULDADE DE ARQUITETURA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Cristian Vinicius Machado Fagundes

**SISTEMA GENERATIVO COMO FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO NO  
PROCESSO EXPLORATÓRIO DO DESIGN DE PRODUTO**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2019

**CRISTIAN VINICIUS MACHADO FAGUNDES**

**Sistema generativo como ferramenta de otimização do processo exploratório do Design de Produto.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do título de Mestre em Design.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Underléa Miotto Bruscato

Porto Alegre

2019

## CIP - Catalogação na Publicação

Fagundes, Cristian Vinicius

Sistema generativo como ferramenta de otimização no processo exploratório do design de produto / Cristian Vinicius Fagundes. -- 2019.

115 f.

Orientadora: Underléa Miotto Bruscato.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Sistema generativo. 2. Design de produto. 3. Desenho paramétrico. 4. Algoritmos evolutivos. I. Miotto Bruscato, Underléa, orient. II. Título.

**Cristian Vinicius Machado Fagundes**

**Sistema generativo como ferramenta de otimização no processo exploratório  
do Design de Produto**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 01 de novembro de 2019.

---

**Prof. Dr. Régio Pierre da Silva**

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

**Banca Examinadora:**

---

Orientador: **Prof. Dr<sup>a</sup>. Underléa Miotto Bruscato**

Departamento de Arquitetura da UFRGS

---

**Prof. Dr.<sup>a</sup> Clarissa de Oliveira Pereira**

Professora de Arquitetura e Urbanismo na UFN – Examinador Externo

---

**Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva**

Departamento de Design e Expressão Gráfica da UFRGS – Examinador Interno

---

**Prof. Dr. Júlio Carlos de Souza van der Linden**

Departamento de Design e Expressão Gráfica da UFRGS – Examinador Interno

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha orientadora, Dr<sup>a</sup>. Underléa Miotto Bruscato, por todo o apoio, dedicação, amizade e orientação em todos os momentos.

Aos meus colegas e amigos que nesta jornada fiz, Augusto Bugin e Cauê Duarte.

Aos meus grandes amigos, Bernardo Abreu e Eduardo Cariolato, pela paciência, apoio e dedicação neste longo processo.

Aos funcionários do Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia da UFRGS (LIFEELAB), por todo aporte.

Aos grandes Mestres por todo o ensinamento e incentivo durante a graduação, em especial para Dr<sup>a</sup> Clarissa Pereira e ao Me. Adriano Falcão.

À minha mãe Claudia Ariane e ao meu pai Amantino Staudt, minhas razões de lutar sempre.

Agradeço a Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante a realização do mestrado.

*Ao meu grande, eterno e fiel amigo, Próculo.*

## RESUMO

FAGUNDES, C. M. F. **Sistema generativo como ferramenta de otimização no processo exploratório do design de produto**. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

No processo de projeção de um produto existem diversos modelos e ferramentas que contribuem para a concepção de um artefato. Os sistemas generativos (SG's) surgem como uma possível ferramenta para a potencialização deste processo. Estudos identificam que a aplicação dos SG's pode trazer benefícios na assistência da criação até fabricação de um produto. Neste contexto, esta pesquisa aplicou um SG formado por ferramentas do desenho paramétrico e algoritmos evolutivos para o estudo e análise da otimização do processo exploratório do Design de Produto diante de modelos tradicionais de projeção. Neste contexto, criou-se um ambiente algorítmico para a realização de simulações digitais por meio da utilização do programa *Grasshopper*® em conjunto aos *plug-ins Biomorpher* e *Galápagos*, bem como a fabricação digital por corte a laser. Para isso, estabeleceram-se (com base em modelos tradicionais e coleta de informações) critérios alvos a serem atingidos, como a tipologia formal dos objetos, custo e tempo de fabricação por corte a laser. Os resultados apontam muitas alternativas proporcionadas pela parametrização do modelo virtual, ocasionando dois fatores: a visualização de alternativas não previstas pelo projetista; e a possibilidade da inserção do algoritmo evolutivo para a otimização dos resultados. Dessa maneira, houve uma redução significativa da população inicial das alternativas, de modo que, foi possível atingir os critérios pré-estabelecidos. Verificou-se também, a eficiência do algoritmo quanto ao tempo de fabricação, com um índice razoável de acerto. Conclui-se que em análise aos processos tradicionais do Design de Produto, os sistemas generativos podem auxiliar desde o processo exploratório, até a concepção do produto.

**Palavras-chave:** Design de Produto; Sistemas Generativos; Fabricação Digital;

## ABSTRACT

FAGUNDES, C. M. F. **Sistema generativo como ferramenta de otimização no processo exploratório do design de produto.** 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

In the process of designing a product there are several models and tools that contribute to the design of an artifact. Generative systems (SG's) appear as a possible tool for the potentiation of this process. Studies have identified that the application of SGs can have benefits in assisting the creation and manufacture of a product. In this context, this research applied a SG formed by parametric design tools and evolutionary algorithms to study and analyze the optimization of the exploratory process of Product Design against traditional design models. In this context, an algorithmic environment has been created for digital simulations by using the *Grasshopper*® program in conjunction with the *Biomorpher* and Galapagos plug-ins, as well as digital laser cutting manufacturing. For this purpose, (based on traditional models and information gathering), target criteria to be met were established, such as the formal typology of the objects, cost and manufacturing time by laser cutting. The results indicate a large number of alternatives provided by the parameterization of the virtual model, causing two factors: the visualization of alternatives not foreseen by the designer; and the possibility of inserting the evolutionary algorithm for the optimization of the results. Thus, there was a significant reduction in the initial population of the alternatives, so that it was possible to achieve the pre-established criteria. It was also verified the efficiency of the algorithm in terms of manufacturing time, with a reasonable hit ratio. It is concluded that in the analysis of the traditional processes of Product Design, generative systems can help from the exploratory process to the product conception.

**Key-words:** Product Design; Generative Systems; Digital Fabrication.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema generativo.....	13
Figura 2 – Assuntos abordados no trabalho.....	17
Figura 3 - Taxonomias da tipologia do problema.....	20
Figura 4 – Ideias centrais do modelo de Baxter.....	22
Figura 5 – Funil de decisões de Baxter.....	23
Figura 6 – Diagrama de soluções dos sistemas generativos.....	27
Figura 7 – Proposta de Durand para um sistema de construção racional.....	30
Figura 8 – Linha do tempo sobre os avanços da utilização dos meios digitais...	33
Figura 9 – Modelo do processo digital de Oxman.....	36
Figura 10 – Modelo parametrizado do estágio desenvolvido por Moretti.....	40
Figura 11 – Interface da ferramenta <i>Grasshopper</i> .....	42
Figura 12 – Menu de componentes da ferramenta <i>Grasshopper</i> .....	43
Figura 13 – Exemplo de um componente.....	43
Figura 14 – Conexões entre componentes .....	44
Figura 15 – Utilização do componente <i>panel</i> .....	44
Figura 16 – Estrutura de funcionamento de um algoritmo evolutivo .....	47
Figura 17 – Conexões do componente <i>Galapagos</i> .....	49
Figura 18 – Gráficos de visualização dos resultados do processo.....	50
Figura 19 – Componente <i>Biomorpher</i> .....	51
Figura 20 – Disposição por semelhanças dos resultados gerados .....	52
Figura 21 – Visualização da população .....	53
Figura 22 – Ilustração do sistema de uma cortadora a laser .....	55
Figura 23 – Sistema generativo proposto por Vettoretti e Turkienicz .....	51
Figura 24 – Variações paramétricas do elemento de controle solar.....	52
Figura 25 – Luminária desenvolvida por fabricação digital.....	60
Figura 26 – Etapas metodológicas.....	61
Figura 27 – Protótipo das luminárias.....	63
Figura 28 – Resultado dos modelos virtuais.....	64
Figura 29 – Construção de pontos (A); Planos (B); Círculos (C).....	67
Figura 30 – Adição (A); Criação dos círculos (B).....	67
Figura 31 – Divisão (A); Criação de linhas (B); Junção (C); Superfícies (D).....	68
Figura 32 – Normais (A); Direção (B); Extrusão (C); Criação da malha (D).....	69
Figura 33 – Perímetro total (A); Velocidades (B); Resultado (C).....	70

Figura 34 – Componentes referentes ao tempo de fabricação.....	71
Figura 35 – Painel com informações do custo de fabricação.....	71
Figura 36 – Informações para a alimentação da ferramenta <i>Biomorpher</i> .....	72
Figura 37 – Seleção (A); Seleção face (B); Orientação (C); Movimentação (D).	75
Figura 38 – Estrutura dos resultados.....	77
Figura 39 – Variações referentes às mutações das circunferências internas.....	78
Figura 40 – Variações referentes às mutações das circunferências externas....	79
Figura 41 – Criação de pontos.....	79
Figura 42 – Ligações dos pontos para a concepção das linhas.....	80
Figura 43 – Criação das superfícies.....	80
Figura 44 - Criação dos elementos tridimensionais.....	81
Figura 45 – Conjunto de uma parcela de possibilidades.....	81
Figura 46 – Conjunto de possibilidades separado por grau de similaridade.....	84
Figura 47 – Geração 1: População gerada pelo processo exploratório.....	85
Figura 48 – Geração 2: Exploração aleatória inicial.....	85
Figura 49 – Alternativa satisfatória para o critério formal.....	85
Figura 50 – Geração 1: Conjunto de alternativas oriundos do indivíduo 10.....	86
Figura 51 – Geração 2: Cruzamento entre indivíduos semelhantes.....	87
Figura 52 – Alternativa utilizada para a otimização do critério.....	88
Figura 53 – Geração 3: Família concebida a partir do objeto 4.....	88
Figura 54 – Geração 4: Família dos indivíduos 1,4 e 9.....	89
Figura 55 – Geração 5: Família dos indivíduos 1,2, 6 e 10.....	90
Figura 56 – Geração 6: Família dos indivíduos 2,8, 9 e 11.....	91
Figura 57 – Valores utilizados para a realização da otimização.....	91
Figura 58 – Resultado da simulação da ferramenta <i>Galapagos</i> .....	92
Figura 59 – Valores de tempo e quantidade de peças.....	92

Figura 60 – Gráficos de visualização da execução do algoritmo.....	93
Figura 61 - Alternativa satisfatória.....	94
Figura 62 – Tempo de corte a laser segundo LaserCut 5.3.....	94
Figura 63 – Tempo de corte a laser segundo DWorksV8.....	95
Figura 64 – Montagem (A) e Fabricação (B).....	95
Figura 65 – Processos tradicionais analisados.....	96
Figura 66 – Modelo de Gui Bonsiepe.....	97
Figura 67 – Definição do problema quanto ao modelo de Bonsiepe.....	98
Figura 68 – Processo de feed-back de Bonsiepe.....	99
Figura 69 – Inserção do sistema generativo no modelo de Bonsiepe.....	100
Figura 70 – Inserção do sistema generativo no modelo de Baxter.....	101
Figura 71 – Inserção no modelo de funil de decisões de Baxter.....	102
Figura 72 – Inserção dos sistemas generativos no modelo de Lobach.....	103

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Técnicas analíticas de Bonsiepe.....	21
<b>Quadro 2</b> – Definições de problemas por Bonsiepe.....	21
<b>Quadro 3</b> – Síntese de modelos de projeto analógicos e digitais.....	37
<b>Quadro 4</b> – Levantamento de luminárias, dimensões e fabricação.....	65
<b>Quadro 5</b> – Critérios principais baseados no modelo de Bonsiepe.....	73
<b>Quadro 6</b> - Critérios auxiliares principais baseados no modelo de Bonsiepe....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>CAD</b>	Desenho assistido por computador
<b>CAM</b>	Manufatura assistida por computador
<b>LIFEELAB</b>	Laboratório de Inovação e Fabricação Digital
<b>MDF</b>	Placa de fibra de média densidade
<b>UFRGS</b>	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA .....	15
1.3 OBJETIVO GERAL.....	16
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	17
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	18
2.1 O PROCESSO DE PROJETO DO DESIGN DE PRODUTO.....	18
2.1.1 Modelo do Processo de Gui Bonsiepe.....	19
2.1.2 Modelo do Processo de Mike Baxter.....	22
2.1.3 Modelo do Processo de Löbach.....	24
2. SISTEMAS GENERATIVOS.....	26
2.2.1 Contexto analógico.....	28
2.2.2 Contexto digital.....	33
2.2.3 Desenho paramétrico.....	40
2.2.4 Algoritmos evolutivos.....	47
2.3 FABRICAÇÃO DIGITAL: CORTE A LASER.....	56
2.4 ESTADO DA ARTE.....	59
2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	63
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	65
3.1 CONCEPÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	66
3.1.1 Determinação da tipologia do objeto.....	66
3.1.2 Modelagem paramétrica.....	70
3.1.3 Algoritmo evolutivo.....	73
3.2 SIMULAÇÃO VIRTUAL.....	76
3.2.1 Exploração.....	76
3.2.2 Otimização.....	78
3.3 MATERIALIZAÇÃO.....	79
3.3.1 Planificação.....	79
3.3.2 Corte a laser.....	80

3.4 INSERÇÃO AOS MODELOS TRADICIONAIS.....	81
3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	81
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>82</b>
4.1 MODELOS PARAMETRIZADOS.....	82
4.2 PROCESSO DE EXPLORAÇÃO.....	88
4.3 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO.....	90
4.3.1 Critério formal.....	90
4.3.2 Critério de custo.....	93
4.3.3 Critério de tempo de corte a laser.....	98
4.4 CORTE A LASER.....	100
4.5 FERRAMENTAS GENERATIVAS EM PROCESSOS TRADICIONAIS.....	102
4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	112
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	114
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	116
REFERÊNCIAS .....	117

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de desenvolvimento de um produto possui diversas ferramentas e modelos, que avançam conforme o surgimento de novas tecnologias, o que resulta em novos métodos para o auxílio da projeção (Baxter, 2011). Neste universo de inovação destacam-se os Sistemas Generativos (SG's).

Os Sistemas Generativos permitem a produção de elementos que possuam semelhanças morfológicas, mas que são diferentes entre si. De modo que um sistema generativo é capaz de produzir arranjos espaciais semelhantes, mas que ainda sim sejam diferentes (SILVA JÚNIOR, 2016).

Os SG's podem ser compreendidos como uma ferramenta de obtenção de soluções a determinados problemas com a característica de gerar diversas alternativas por meio da utilização de um processo lógico formado por um conjunto de regras e parâmetros, concebidos com o uso de ferramentas analógicas ou digitais (FISCHER E HERR, 2011). Os SG's podem ser aplicados em processos de projeto exploratórios ou processos totalmente automatizados. Independentemente do caso, a concepção do mecanismo de um SG descende de um conjunto de regramentos aplicados a distintas ordens e combinações ou por modelos geométricos paramétricos (SEDREZ, 2018).

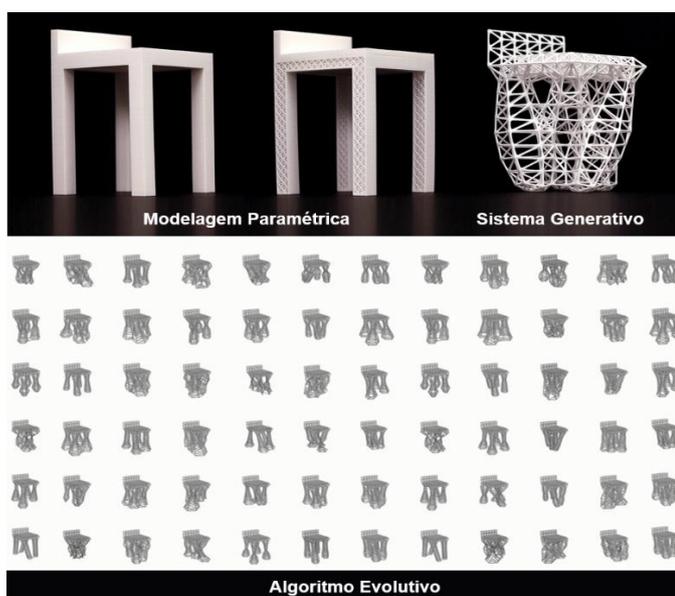
Ao longo da história, as primeiras aplicações dos SG's em etapas de projeção têm origem na Arquitetura Clássica no século XV, principalmente com Alberti e posteriormente Palladio. Ambos utilizaram conceitos e termos relacionados à lógica, como o emprego de regramentos no processo de projeto por meio da utilização da proporcionalidade e da simetria de elementos compositivos das edificações (TERZIDIS, 2003, p. 14). Posteriormente, as teorias naturalistas como a evolução natural de Lamarck e Darwin, serviram como aporte para a criação dos primeiros SG's inspirados em estudos biológicos, como a mutação e recombinação genética em processos naturais de sobrevivência de indivíduos. A união destes conceitos, em conjunto ao advento tecnológico digital do século XX (principalmente através dos recursos CAD) eclodiram para a disseminação dos SG's em etapas compositivas de projeto. Diante deste contexto, criaram-se diversos SG's unidos a computação, dando origem a distintas classificações, como os sistemas baseados na lógica e os sistemas

inspirados na biologia. Dentre eles, destacam-se dois modelos adotados nesta pesquisa: o desenho paramétrico e os algoritmos evolutivos. Uma vez que a intenção desta pesquisa é testar e analisar a união das ferramentas generativas no auxílio às etapas de exploração e otimização do processo de projeto do design de produto, desde a concepção à fabricação digital, aplicou-se a união destes dois sistemas, bem como suas ferramentas.

A modelagem paramétrica pertence ao grupo baseado na lógica, e possui o mecanismo de substituição sistemática de valores, dessa maneira, a ferramenta possibilita a exploração de múltiplas alternativas (CELANI, VAZ E PUPO, 2013). A aplicação otimizada do sistema deve-se ao uso de ferramentas digitais, onde permite-se a construção de regras, relações entre objetos e relacionamentos de dependências, com o uso de variáveis chamadas de parâmetros (FLORIO, 2014). Já os algoritmos evolutivos são inspirados em estudos da biologia por meio do emprego dos conceitos da evolução natural na programação evolutiva para aplicação da obtenção de soluções, por meio da exploração de alternativas (MARTINO, 2018).

Em resumo, o conjunto da Figura 1 retrata um sistema generativo formado pela união destas duas técnicas como ferramenta de projeção, destaca-se: a criação de um objeto parametrizado com medidas e restrições pré-estabelecidas e utilização do algoritmo evolutivo para a otimização do processo exploratório das alternativas.

**Figura 1 – Sistema generativo.**



Fonte: adaptado de Autodesk, 2014

A união destes inovadores métodos exige novos métodos de fabricação, diante disto, para a integração de todo o processo projetual, desde concepção à produção do produto, destaca-se a utilização do método de corte a laser para a fabricação digital. O corte a laser é um método subtrativo digital de fabricação, o qual caracteriza-se pela remoção do material por dissolução ou desbaste da superfície da matéria prima (KOLAREVIC, 2005; VOLPATO 2007; NETO, 2018). O método torna-se acessível pelo baixo custo de produção em comparação a outros métodos, bem como a utilização de softwares comuns entre os projetistas (PUPO, 2009).

### 1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

As etapas de projeção estão cada vez mais interligadas aos ambientes computacionais (SEDREZ, 2016). A união de métodos generativos às tecnologias digitais pode oferecer distintas abordagens à concepção e tratamento das informações no processo de projeto, viabilizando novas estratégias mentais e metodológicas aos projetistas (KOLAREVIC, 2005). Neste contexto, Meredith (2008) defende que processo de projeto não é apenas um ato criativo, necessita também de preocupações racionais, que respeitem os requisitos funcionais, ergonômicos e performativos. Contudo, diante destas tecnologias, na maioria dos casos, explora-se minimamente o potencial da base lógica da computação para a otimização do processo, tornando seu uso, ainda como uma ferramenta analógica (HENRIQUES, 2013). Ou seja, nos projetos paramétricos algorítmicos cria-se um universo de alternativas a um determinado problema, que geralmente são mal definidos, sem que se alcancem os resultados satisfatórios, fazendo com que o tempo de busca das melhores alternativas torne-se exaustiva (CELANI, VAZ E PUPO, 2011).

Diante disso, algumas das maiores dificuldades é a criação de um processo lógico de programação para a formulação de um produto, pois as novas tecnologias passam a demandar um projeto exclusivo para a confecção do artefato, em que todos os parâmetros e variáveis devem ser considerados para um resultado satisfatório do produto (PUPO, 2009).

Neste contexto, pergunta-se: as ferramentas generativas como a modelagem paramétrica e os algoritmos evolutivos podem auxiliar na otimização do processo exploratório de projeto, desde a concepção até a fabricação de um artefato?

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As novas tecnologias em conjunto com ferramentas de trocas rápidas, minimizam o tempo de desenvolvimento e fabricação de novos produtos. Com isso, diversos produtos tornam-se integralmente projetados, desenvolvidos, analisados e testados com uso destas ferramentas digitais e, posteriormente fabricados por meio destas tecnologias (BAXTER, 2011). Tais recursos, tanto de hardware quanto de software, unidos a mecanismos generativos, podem viabilizar uma nova forma de projeção (LANCELLE, 2015).

A modelagem paramétrica representa este novo cenário, uma vez que, caracteriza-se pela criação de processo formado por variáveis (parâmetros). O uso deste processo, possibilita a rápida interação visual do universo de soluções, visto que, utiliza de uma série de atribuições prévias às variáveis, que podem estar interligadas a um processo algoritmo, o que viabiliza integração total do processo (HENRIQUES, 2013). Uma vez que a modelagem paramétrica auxilia na rápida alternância de valores das variáveis, e ocasiona ao projetista, um universo de possibilidades, torna-se necessário um sistema que otimize o processo de busca das soluções mais satisfatórias, pois um amplo universo de soluções pode desorientar a escolha dos melhores resultados (CELANI; VAZ E PUPO, 2011). Desta forma, a utilização dos algoritmos evolutivos faz-se interessante, visto que, o sistema é capaz de otimizar o processo exploratório diante dos critérios pré-estabelecidos pelo projetista, por meio de um processo de mutação e recombinação de soluções, de forma a utilizar o potencial lógico da computação (MARTINO, 2015).

Atualmente há uma grande aceitação de novas diretrizes metodológicas devido à necessidade de um desenvolvimento em curto espaço de tempo, mas com alta qualidade na solução (PAZMINO, 2010, p. 117). Os métodos devem ser considerados, assim, instrumentos e não apenas uma receita guiada. Assim, a metodologia de projeto torna-se um conjunto de instrumentos que são utilizados para auxiliar o designer durante o processo de projeto. Pode-se perceber que tem surgido um novo interesse na metodologia de projeto, mas que muito do que foi publicado pertence ao campo da engenharia e da arquitetura, e em menor número ao design (PAZMINO, 2010, p. 130).

Sobretudo, torna-se importante a inserção destas novas ferramentas nos modelos tradicionais de projeção com a finalidade de contribuir com processo como um todo, bem como destacar as ferramentas generativas derivadas das mais diversas áreas como novas técnicas.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é testar por meio de experimentos a aplicação de um sistema generativo formado pelo desenho paramétrico e algoritmos evolutivos e orientado à fabricação digital por corte a laser, visando a otimização do processo exploratório formal de projeto do design de produto.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

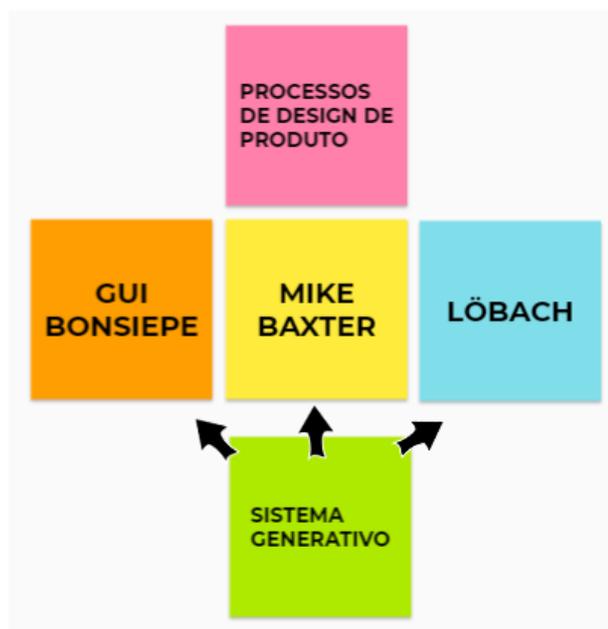
Os objetivos específicos da dissertação são:

- a) Estudar sobre os modelos tradicionais do processo do projeto de produto para situar a aplicação dos sistemas generativos nestes processos;
- b) Revisar a literatura acerca dos sistemas generativos para indicar a união das ferramentas de modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos;
- c) Indicar a tipologia do modelo virtual parametrizado para a realização dos experimentos;
- d) Definir as variáveis e parâmetros para a criação do algoritmo evolutivo orientado ao corte a laser;
- e) Testar o sistema generativo por meio das ferramentas *Galapagos* e *Biomorpher* para o estudo de otimização do processo exploratório formal de projeto;
- f) Analisar o processo generativo gerado para indicar sua inserção aos modelos tradicionais de projeto de produto.

### 1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A formulação da questão norteadora da pesquisa teve ênfase inicial o teste de ferramentas generativas como método de processo de projeto, delimitando à modelagem paramétrica e aos algoritmos evolutivos orientados a fabricação digital por corte a laser.

**Figura 2** – Assuntos abordados no trabalho.



Fonte: acervo do Autor.

A busca serviu para compreender o mecanismo destas ferramentas, bem como suas aplicações na otimização do processo exploratório de projeto no Design de Produto. Com a segunda etapa, relativa aos experimentos, foi possível testar a aplicação da união destas ferramentas generativas, com o objetivo de otimizar o campo de soluções de projeção, que posteriormente possibilitou a construção de resultados quali-quantitativos que apontam a eficiência dos métodos, bem como sua inserção aos modelos tradicionais de projeção de produtos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados alguns modelos tradicionais do processo de projeto em Design. O contexto histórico dos eventos que motivaram os princípios da criação dos sistemas generativos, como a modelagem paramétrica e os algoritmos evolutivos, bem como suas ferramentas utilizadas na otimização do processo exploratório. A fabricação digital por corte a laser como um método de materialização. E um breve resumo do estado da arte destes assuntos.

### 2.1 O PROCESSO DE PROJETO DO DESIGN DE PRODUTO

De modo geral, o processo de projeto, pode ser definido como uma abordagem de concepção e tratamento de diferentes informações e conceitos, com distintas estratégias mentais e metodológicas, que abrangem distintos sentidos, abstrações e representações, tal quais orientadas a antecipar a criação de um artefato à sua fabricação (KOWALTOWSKI, 2011). Já o design de produto pode ser descrito como a materialização da ideia, que corresponde à um amplo processo formado pela criação e desenvolvimento de uma idealização, com a função de resolver problemas resultantes de necessidades humanas (LOBACH, 2001, p.28-30). Tal campo, abrange inúmeras disciplinas para a criação ou modificação de um produto (CELUPPI, 2018).

Como destaca Bürdek (2006), há desde a idade dos ancestrais indícios de produtos que foram concebidos com a finalidade de serem otimizados ao uso do homem (BÜRDEK, 2006, p. 17). Sobretudo, com o advento de novas tecnologias há uma diminuição do tempo de lançamento de novos produtos, principalmente pela utilização dos recursos CAD em conjunto com ferramentas de trocas rápidas. (BAXTER, 2011, p.1). Como por exemplo, a utilização de processos algorítmicos por meio da criação de sistemas generativos para a resolução de problemas, bem como a produção rápida por fabricação digital. Neste contexto, como destaca Celuppi (2018) as ferramentas podem ser aplicadas para estimular ideias, analisar problemas, e formular as atividades de projeto. Visto que, como destaca Barros (2017):

O desenvolvimento de produtos e sistemas de modo multidisciplinar necessita de abordagens que favoreçam a colaboração entre as diferentes especialidades envolvidas. Cada especialidade possui competências específicas. Arquitetura, Urbanismo, Engenharias e o Design são macro áreas altamente correlacionadas que estão associadas ao desenvolvimento de novos produtos e sistemas técnicos.

Pazmino (2010) defende que a concepção de um artefato, é um resultado de um processo formado por um conjunto de critérios racionais e intuitivos, em que o projetista realiza até alcançar o resultado desejado. Ainda ressalta que, devido à complexidade atual da problemática de projeto, impulsionada pela globalização, novas tecnologias necessitam da aplicação de novos métodos de projeção, bem como a aplicação e inserção de novas ferramentas para o desenvolvimento de novos produtos.

Neste contexto, para melhor compreensão da análise dos sistemas generativos aliado a fabricação digital como ferramentas em etapas de projeção, serão destacados alguns modelos tradicionais do processo de projeto de produto. Os métodos ou modelos a seguir foram escolhidos devido a sua importância como referência para o design de produto, dentre eles como destaca Celuppi (2018), os principais métodos são: Bonsiepe (1984), Baxter (1998) e Löbach (2001).

### **2.1.1 Modelo do Processo de Gui Bonsiepe**

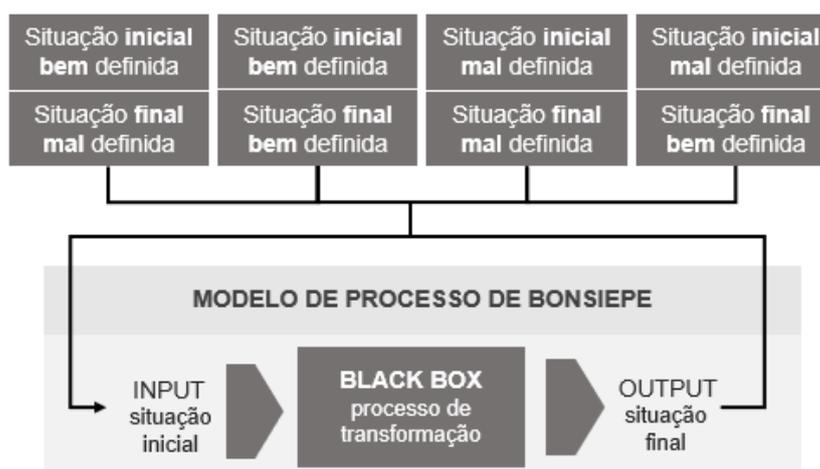
O modelo do processo do Gui Bonsiepe foi apresentado no ano de 1984 com um sistema de divisão do processo de projeção, em cinco fases: a problematização, a análise, a definição do problema, o anteprojeto-geração de alternativas e o projeto (PAZMINO, 2010).

O Designer alemão Georg Hans Max Bonsiepe, mais conhecido como Gui Bonsiepe, é referência mundial quando se trata de Design. Estudou Design na Hochschule für Gestaltung, Ulm (HFG – ULM), trabalhou em escritórios de projeto e foi docente em diversas universidades latino-americanas, europeias, norte-americanas e asiáticas (CELUPPI, 2018).

Bonsiepe (1984) destaca que a metodologia projetual não é uma receita de bolo, e sim uma maneira de aumentar a probabilidade de sucesso. O autor concentra-se principalmente nas definições dos problemas para estruturar a metodologia do processo de projeto, para isso, descreve a taxonomia do problema (Figura 3) em quatro estágios. Pazmino (2010) afirma que o autor foi um dos percursores na classificação dos problemas, estruturando como: problemas bem definidos, mal definidos ou problemas estruturados ou problemas não estruturados. Para isso, o autor descreve que a situação inicial são fatores influentes do problema, ou seja, o

que se deve melhorar para a solução da situação. A partir de então cria-se um processo de transformação, onde são demarcados os caminhos, métodos, técnicas e ferramentas para tal solução.

**Figura 3** – Taxonomias da tipologia do problema.



Fonte: adaptado de Bonsiepe, 1984.

Bonsiepe destaca ainda, que a metodologia “dá uma orientação no procedimento do processo”. Diante disso, o autor subdivide o processo projetual nos seguintes passos:

1. Problematização;
2. Análise;
3. Definição do problema;
4. Anteprojeto;
5. Geração de alternativas;
6. Avaliação, decisão, escolha;
7. Realização;
8. Análise final da solução.

Na etapa de análise, Bonsiepe cita 5 tipologias (Quadro 1), dentre elas: lista de verificação; análise de produto existentes em relação ao uso; análise diacrônica do desenvolvimento histórico, análise sincrônica e análise estrutural. Para o autor, o objetivo desta etapa é a criação de um conjunto de informações para auxiliar no

desenvolvimento das alternativas, bem como esclarecer a problemática projetual por meio da coleta de informações.

**Quadro 1** – Técnicas analíticas de Bonsiepe.

<b>2. TÉCNICAS ANALÍTICAS</b>	<b>Descrição</b>
2.1 Listas de verificação	Organizar as informações sobre os atributos de um produto.
2.2 Análise de produto existentes em relação ao uso	Detectar pontos negativos e criticáveis.
3.3 Análise diacrônica do desenvolvimento histórico	Detectar mutações do produto no transcurso do tempo.
3.4 Análise sincrônica	Universo da tipologia do produto, preços, matérias e processos de fabricação.
3.5 Análise estrutural	Reconhecer e compreender tipos, número de componentes, montagem, uniões.
3.6 Análise funcional	Reconhecer e compreender as características de uso do produto.
3.7 Análise morfológica	Reconhecer e compreender a estrutura formal (concepção formal) de um produto.

Fonte: adaptado de Bonsiepe, 1984.

Posteriormente, na etapa referente a definição do problema, Bonsiepe destaca, 3 tipologias (Quadro 2) de suma importância para esta pesquisa, dentre elas: lista de requisitos, estruturação do problema e valorização do peso (matrizes de operação).

**Quadro 2** – Definições de problemas por Bonsiepe.

<b>3. Definição do problema</b>	<b>Descrição</b>
3.1 Lista de requisitos	Orientar as metas a serem atingidas.
3.2 Estruturação do problema	Ordenar os requerimentos em grupos por afinidade.
3.3 Valorização do peso	Estabelecer as prioridades dos requisitos.

Fonte: adaptado de Bonsiepe, 1984.

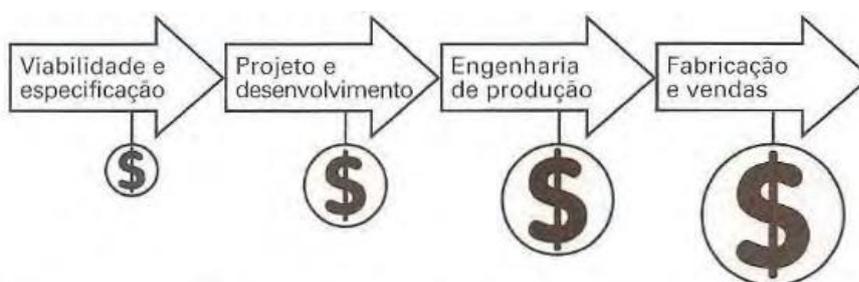
Os estudos de Celuppi (2018) retrata o método projetual de Bonsiepe e os encontros disciplinares no Brasil. A autora identifica a aplicação do modelo, bem como, suas usabilidades em distintas áreas e diferentes etapas no processo de projeção. De modo que, conforme Celuppi (2018) o modelo pode ser denominado como interdisciplinar capaz de criar uma abordagem por meio de estudos de diversas áreas.

A autora identifica que as etapas de análise e definição do problema possuem maior flexibilidade, possibilitando a inserção de novos métodos, justamente pela interdisciplinaridade do modelo.

### 2.1.2 Modelo do Processo de Mike Baxter

O modelo de processo de Baxter volta-se para o desenvolvimento de produto como uma oportunidade de negócios, para isso, as ideias centrais de Baxter centralizam-se no controle e gerenciamento do processo da produção como um todo (Figura 4). Celuppi (2018) destaca que o autor prioriza a gestão do design, por meio da integração de especialistas das mais diversas áreas. Neste contexto, Baxter (2002, p.7) inicia suas argumentações para o princípio do desenvolvimento de novos produtos por meio de um processo linear (Figura 3).

**Figura 4** – Ideias centrais do modelo de Baxter.



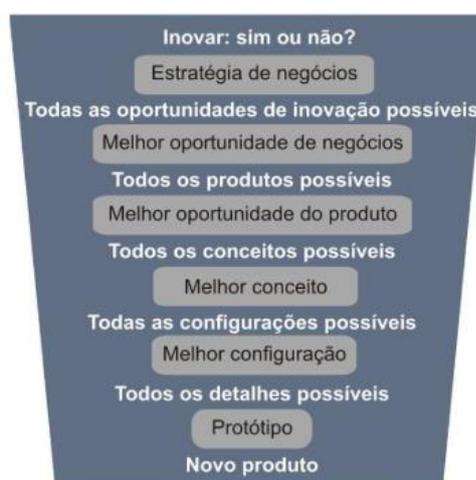
Fonte: Baxter, 1998.

Primeiramente, o autor destaca as orientações para o mercado, que para ele, é o fator mais importante. Baxter (2011) retrata o planejamento e especificação do produto, ou seja. Nesta etapa, o autor destaca que o estudo de viabilidade técnica e econômica de um produto tende a aumentar as chances de sucesso em relação aos projetos sem o estudo prévio. Para isso, deve-se atender aos requisitos como a

disponibilidade de materiais, componentes, processos produtivos e mão-de-obra. A viabilidade econômica como necessidades de investimentos, custos e retorno capital. Baxter (2011, p. 8) destaca ainda que, “na atividade de desenvolvimento de novos produtos, a incerteza é alta na fase inicial, você não tem ideia clara do que resultará, como vai ser feito, quanto custará e qual será grau da aceitação dos consumidores”.

Na segunda etapa, a qual refere-se ao projeto propriamente dito, dá-se o início da concepção do conceito e a exploração das ideias (PAZMINO, 2010). Nesta etapa, como ressalta Baxter (2011), em relação às etapas anteriores é onde ocorrem os menores riscos e incertezas. Diante disso, Baxter (2011) desenvolveu seu modelo chamado de funil de decisões (Figura 5). O modelo é organizado como um sistema linear. Trata-se de um sistema esquemático para destacar o caminho da tomada de decisões, não sendo uma representação das atividades de projeto e tão pouco o retrato do pensamento e maneira de trabalho do designer (PAZMINO, 2010). Para Baxter (1998. p.9) “o modelo é uma maneira de visualizar as variações do risco e incerteza ao longo do processo de desenvolvimento do novo produto”. O modelo pode demonstrar por meio do teste de soluções a verificação das melhores alternativas, ou seja, a otimização do processo exploratório, dessa forma, pode haver uma diminuição do risco e incerteza ao longo do processo (BAHIA, CAMPOS, 2016).

**Figura 5** – Funil de decisões de Baxter.



Fonte: Baxter 2011.

Em suma, o modelo retrata a tentativa de uma diminuição das alternativas menos satisfatórias até chegar à solução desejada. Para isso, destaca-se a refinação

das alternativas para alcançar o objetivo traçado. Baxter, destaca inúmeras ferramentas para auxiliar no desenvolvimento orientado a modelo. Contudo, o modelo de Baxter está sempre relacionado ao teste de mercado, ou seja, na aplicação direta de variáveis para promover um respaldo da aceitação dos usuários (BAXTER, 2011; PAZMINO, 2010).

Visto que esta pesquisa tem como objetivo testar ferramentas generativas que otimizem o processo exploratório do design de produto e alguns critérios utilizados para a concepção dos experimentos foi a utilização do valor final do produto, optou-se por estudar o modelo de Mike Baxter. Vale ressaltar que para este estudo o valor final possui apenas caráter simbólico, com parâmetros e valores de corte a laser, não retratando o processo do produto como uma oportunidade de negócios, como destaca Baxter.

### **2.1.3 Modelo do Processo de Löbach**

O modelo de Löbach, retrata o processo criativo como um processo de resoluções de problemas. Para Löbach (2001, p. 143-155) as soluções são desenvolvidas em virtude do grau de coleta de informações para a avaliação das soluções mais adequadas. O autor destaca que no processo de desenvolvimento de um produto, os problemas podem ser bem definidos à medida que há uma eficiente coleta de informações acerca do problema. Uma vez que, possibilita a análise e criação de alternativas para o problema, que são julgadas diante de critérios pré-estabelecidos.

Neste contexto, o autor divide o modelo em quatro etapas, em uma configuração linear. Dentre elas: a análise do problema; geração de alternativas; avaliação das alternativas; realização da solução.

Löbach (2001, p. 143-146) define a fase 1 como a análise do problema, é a etapa que envolve o conhecimento, ou seja, a motivação para o desenvolvimento do produto. Nesta etapa ocorre a coleta das informações do problema (de suma importância) para a demarcação dos critérios de avaliações na etapa posterior). Para isso, o autor cita diversas formas para a realização destas coletas, dentre elas, destaca-se para esta pesquisa, a análise de configuração, onde são estudados os critérios de aparência estética dos produtos existentes no mercado (PAZMINO, 2010).

E a análise estrutural para maior embasamento sobre dimensões, número de peças e forma construtiva para a materialização do produto. Löbach (2001, p. 147) descreve outros tipos de análises, como a análise da necessidade, análise da relação social, análise do mercado, análise da função, sobretudo, devido a tipologia deste estudo, estas análises não foram utilizadas.

Na fase seguinte, o autor destaca a geração de alternativas. É a etapa da produção de ideias com a utilização das informações anteriormente. Löbach (2001, p. 150-153) cita que neste momento gera-se uma grande produção de ideias, sem julgamentos prévios, ou seja, associam-se ideias e combinações com a finalidade de prepará-las para a etapa de avaliação.

A terceira fase do modelo de Löbach (2001, p.154), a fase de avaliação, norteia-se pela visualização de todas as alternativas preliminares com a finalidade de encontrar a solução satisfatória diante dos critérios pré-estabelecidos. O autor destaca ainda, a utilização de duas variáveis para o complemento da resolução da etapa: a importância do novo produto para o usuário ou a importância do novo produto para êxito financeiro da empresa. Para isso, os critérios iniciais da etapa 1 devem estar bem definidos.

Por fim, o último passo, é a etapa da realização da solução do problema, ou seja, é a materialização da ideia. Nesta etapa, não necessariamente fabrica-se uma alternativa isoladamente, torna-se possível também, a elaboração de um conjunto de combinações das alternativas satisfatórias. Sobretudo, nesta etapa, é onde o projetista determina exatamente as dimensões, estruturas, entre outras características do produto. Sobretudo, diante da rápida abordagem dos modelos tradicionais do processo de projeto do design de produto, evidencia-se que os modelos necessariamente não exercem a função de criar uma “receita de bolo”, mas sim métodos que auxiliem no processo. Com isso, abre-se a possibilidade da utilização de novas ferramentas que impulsionem a potencialidades destes modelos. Desse modo, no próximo item, serão destacados o SG's, como possíveis ferramentas de otimização destes modelos (LÖBACH, 2001; PAZMINO, 2010)

## 2.2 SISTEMAS GENERATIVOS

Os Sistemas Generativos (SG's) são definidos como uma ferramenta de exploração de resultados em projetos de arquitetura, design e engenharia. Com um conceito inverso à alguns casos do método tradicional de projeção, onde a preocupação concentra-se em apenas uma alternativa de resolução à uma determinada questão (FISCHER E HERR, 2001). Os SG's caracterizam-se pela composição de um processo lógico com inúmeras alternativas para solucionar um problema (MARTINO, 2015). A formulação desta ferramenta deriva de um conjunto padronizado de ideias, que se inter-relacionam através de regras, princípios e harmonização entre um pensamento lógico e processos metódicos (MITCHELL, 1989). O uso deste conjunto pode oferecer um amplo campo de soluções, por meio de processos de geração e avaliação de soluções em projeto, com utilização de estratégias eficientes para a resolução de problemas, sendo necessário o entendimento do projetista diante às variáveis do processo como um todo, bem como definições de componentes até as relações entre cada um deles (MARTINO, 2015).

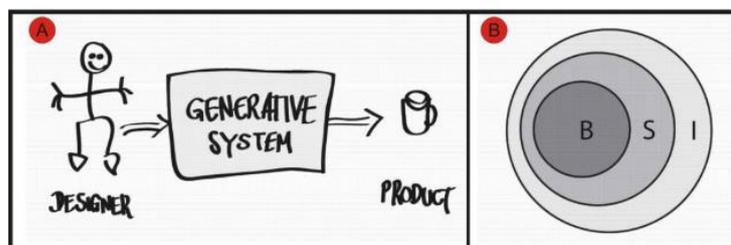
Um mecanismo generativo pode ser constituído por um ou mais SG's, tal fator depende da taxonomia do problema e da tipologia dos resultados desejados. Contudo, de certa forma, a concepção do mecanismo generativo digital é um processo genérico e divide-se em quatro etapas, sendo elas: o entendimento da problemática do projeto, na qual revela-se o conjunto estratégico das soluções generativas; as informações e dados do problema; os parâmetros que podem ser variáveis ou não; a estrutura lógica para a resolução das soluções; e o resultado das soluções (DINO, 2012).

Como o mecanismo é metódico, as informações de cada etapa estão interligadas a situação inicial da problemática do projeto, na qual abrange o entendimento do projetista diante da situação como um todo para a adoção da estratégia a ser utilizada no processo. Diante disso, torna-se necessária a identificação da situação inicial da taxonomia do problema (visto anteriormente no item 2.1.1).

Neste contexto, como destaca-se na Figura 6, por vezes um problema bem-definido possui apenas um pequeno grupo de soluções ou até mesmo apenas uma solução, já um problema mal definido pode integrar diversas possíveis alternativas, com isso, geralmente os SG's são utilizados para solucionar problemas mal definidos,

por meio da criação de um campo de soluções em que as respostas podem ou não serem satisfatórias. (CELANI, VAZ e PUPO, 2013).

**Figura 6** – Diagrama de soluções dos sistemas generativos.



Fonte: Celani, Vaz e Pupo 2013.

Para estes casos, alguns SG's são formulados para atingir um conjunto de soluções satisfatórias, com isso, o sistema necessita de um procedimento de avaliação e otimização, que deve levar em consideração os fatores essenciais do problema, como os objetivos e a finalidade do projeto como um todo, conseqüentemente dando origem aos requisitos e critérios das melhores soluções possíveis (MARTINO, 2015). Dessa maneira, a aplicação do sistema pode ser dividida em três situações, como destacam (Celani, Vaz e Pupo, 2013):

- a) Otimização:** pode ser utilizada geralmente quando os critérios do problema estão bem demarcados e definidos, mas sem um método direto para a escolha da solução, para isso realiza-se um teste de todas as viáveis possibilidades, a fim de encontrar a alternativa desejada;
- b) Geração de famílias de objetos:** para esta situação, quando há necessidade de gerar um amplo conjunto de possibilidades, cria-se um grupo de soluções em que os objetos possuam uma semelhança entre si, porém com características ligeiramente distintas;
- c) Exploração:** possui a função de criar várias possibilidades quando os critérios de necessidades do projeto não estão bem demarcados e definidos, para isso geram-se múltiplas possibilidades para encontrar a solução satisfatória.

Diante disso, para essa pesquisa, tais aplicações serão amplamente testadas por meio da aplicação de ferramentas generativas e servirão como norteamento para o decorrer do estudo. Para isso, faz-se necessário um entendimento prévio do contexto histórico da inserção desta ferramenta no processo de projeto analógico e

digital em arquitetura e design para a compreensão mais clara das definições, classificações e usabilidades desta ferramenta ao longo do tempo.

### 2.2.1 Contexto analógico

O uso de SG's não é algo recente no processo de projeto (DINO, 2012). As técnicas já existiam muitos antes da revolução digital (AGKATHIDIS, 2016). Os SG's surgiram na Antiguidade Clássica, com a função de gerar alternativas ao processo clássico de projeto, onde, sistematicamente, o projetista passa a criar sistemas próprios de regras para conceber um método gerador de projeto (MITCHELL, 1999).

No início dos anos 70, William Mitchell (1989) destacou que o conceito dos SG's já fora utilizado desde a Antiguidade Clássica. O início deu-se no período Renascentista com Leon Battista Alberti (1404-1472), que retratou a importância da utilização de regras para a etapa de projeto. As teorias de Alberti foram escritas por meio de um texto de 10 volumes, chamado *De re aedificatoria* em 1452 (STRICKLAND, 2003, p. 59). O arquiteto procurou fundamentar e formular um sistema universal de projeção, Alberti não tinha como intenção oferecer o ensinamento dos princípios clássicos de projeto, mas sim em considerar todos os valores universais de uma obra, como: proporções; funcionalidade; aplicabilidade e formalismo (MITCHELL, 1999).

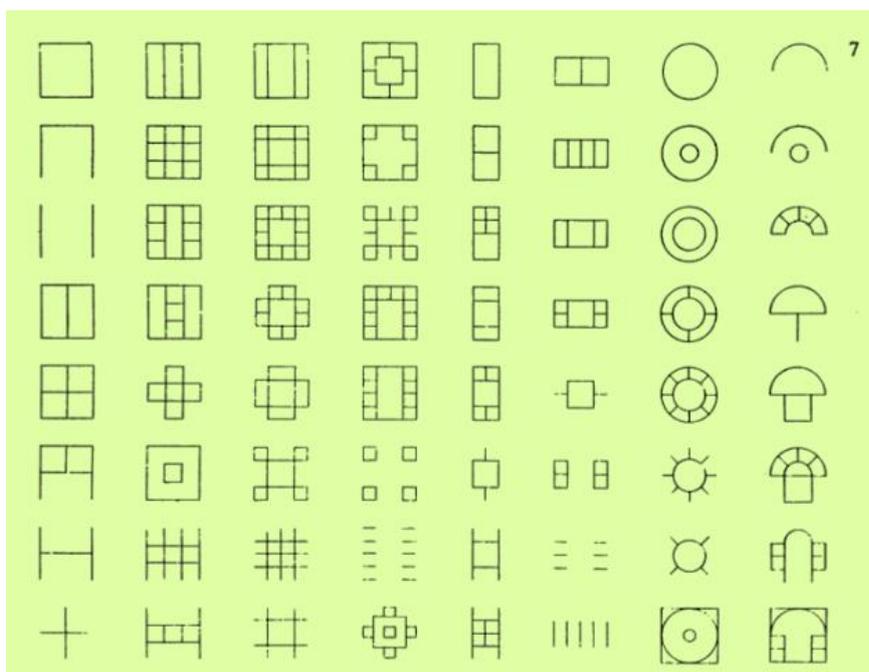
Posteriormente no século 16, inspirado em Alberti, Andrea Palladio (1508-1580) retratou nos tratados *I Quattro Libri dell'Architettura*, um dos mais importantes textos da arquitetura, diversos estudos relacionados ao desenho e projetos arquitetônicos. Os estudos de Palladio também ressaltaram a importância da utilização de regras no processo de projeto, porém, em contrapartida à Alberti, investigou a simetria como forma de padronizar procedimentos compositivos, ressaltando as potencialidades do instrumento em projeto (STUMPP, 2013). O sistema proposto (Figura 2) por Palladio destacou a importância da proporcionalidade e da distribuição dos espaços em uma edificação (CELANI, VAZ e PUPO, 2013). Em sua tese, Stumpp (2013) destaca que: "Palladio formulou um sistema de modulação dimensional que se desdobra em um procedimento de controle geométrico do projeto". Stumpp (2013), complementa que o arquiteto: "configurou um sistema de controle tridimensional que ultrapassa a mera organização bilateral". O sistema de Palladio foi desenvolvido através de um conjunto

de regras dimensionais que envolvem comprimento, largura e altura dos compartimentos. Destacando o propósito de que um sistema necessita de um conjunto padronizado de ideias e um pensamento sistemático e metódico. Este pensamento racional ganhou força com importantes pensadores na época, Descartes (1596-1650) tinha crença de que as situações complexas poderiam ser resolvidas por meio da racionalidade, com análises, intuição e dedução. Leibniz (1646-1717) através de procedimentos lógicos e matemáticos tentou demonstrar que todas as verdades poderiam ser descobertas e comprovadas com o uso de um pensamento científico racional (BURDEK, 2006; HENRIQUES, 2013).

O processo lógico e racional ganhou mais força devido ao manifesto da união entre o homem e a máquina, fato ocorrido na transição do fim do período Renascentista ao período da Revolução Industrial no século 18. A união entre ambos resultou em avanços e otimizações para a produção em massa, potencializando o pensamento racionalista (MALDONADO, 2009, p. 21-27). O resultado da combinação entre a industrialização, urbanização e globalização nesta época, culminou para a eclosão do design de produto (CARDOSO, 2011, p.22-23). Como consequência, dividiram-se as etapas de projeto e execução de um artefato (BURDEK, 2006, p.19). O projeto ganhou mais importância, pois bastava um bom projetista para criar um produto que viabilizasse sua fabricação em larga escala, tornando o sistema mais lucrativo (CARDOSO, 2011, p.34). Consequentemente tais mudanças impulsionaram a divisão entre concepção e execução na produção de um determinado objeto, o projeto tornou-se peça chave para a fabricação, orientado a um sistema cada vez mais racionalista (CARDOSO, 2011).

Neste contexto, Jean-Nicolas-Louis-Durand (1760-1834) utilizou diversas combinações da forma primária para elaborar um sistema generativo racional (Figura 7). Os textos escritos pelo arquiteto, retratam uma composição que prioriza critérios funcionais e econômicos, reflexo da então atual fase da sociedade (OLASOV, 1987).

**Figura 7** – Proposta de Durand para um sistema de construção racional.



Fonte: OLASOV, 1987.

Através da utilização da geometria básica, Durand, combinou os elementos da arquitetura clássica (CELANI, VAZ e PUPO, 2013). A combinação envolveu a forma e a proporção destes elementos, a fim de criar uma relação entre o material e o uso da edificação, com a finalidade de aplicar uma distribuição racionalista (OLASOV, 1987).

Dessa maneira, com o pensamento racionalista, a matemática tornou-se peça chave para a criação dos primeiros SG's no processo de projeto. Com isso, diversos conceitos oriundos desta ciência principiaram a ideia central do SG's e destacaram em primeiro momento, a utilização destas ferramentas ligadas a estudos lógicos, racionais e geométricos. Tais estudos, posteriormente, unidos a ferramentas digitais, deram origem aos SG's baseados na lógica, como a gramática da forma, projeto paramétrico, simetria, combinatória, entre outros.

Contudo, na metade do século 19, antes da Revolução Digital, os projetistas vanguardistas se dispuseram a questionar esta historicidade racional de projeção. Impulsionados pelos pensamentos de filósofos como: *Georg Wilhelm Friedrich Hegel* (1770-1831), sendo o precursor do ideal de que o processo é formado pela natureza, história e pensamento, com influências na modificação do mundo natural, histórico e intelectual; e *Friedrich Engels* (1820-1895) defensor do conhecimento de que as condições existências, históricas e destrutivas ou transformativas são peças chaves

para o desenvolvimento do objeto (BÜRDEK, 2006). A atenção voltou-se para precedentes da natureza (AGKATHIDIS, 2016). Santos (2014, p. 115) destaca ainda:

A segunda metade do século XIX fica marcada na arte, pelos avanços tecnológicos da época, pelas reformas artísticas e pelas descobertas naturais, onde os trabalhos científicos de Darwin e Haeckel, têm principal relevância. Seguindo o espírito reformista de Morris, e aliados ao contexto histórico-social europeu, denominado de belle époque, vão surgir novos movimentos artísticos, por todo o continente europeu, na procura de novas expressões, que se identificassem melhor com o espírito progressista da época.

Com isso, diversos pensadores propuseram-se a observar a natureza, dentre eles, o naturalista *Jean-Baptiste de Lamarck* (1798-1829) que iniciou estudos para buscar a explicação da transformação dos seres vivos (SALZANO, 2008). E logo após, Charles Darwin (1809-1887) desenvolve seu trabalho científico através do livro *On The Origin of The Species*<sup>1</sup> (1859) fruto de uma expedição às Ilhas Galápagos. O estudo de Darwin propõe que toda a forma de vida possui descendência de um ancestral comum, ainda, introduz um novo conceito chamado “seleção natural”, uma teoria que explica que os organismos naturais que melhor se adaptam ao ambiente tendem a se reproduzirem mais e por consequência sobreviverem por mais tempo, tal teoria, posteriormente virá a ser importante para o desenvolvimento dos algoritmos genéticos e evolutivos (MARTINO, 2015; SANTOS, 2014).

Com isso, aprofundaram-se os estudos de observação e compreensão dos principais fenômenos da natureza. Dentre eles, na transição do século 19 para o 20, destacam-se os projetos de Emile Gallé (1846-1904). O designer francês procurou transmitir características de uma “linguagem viva” oriunda da inspiração da natureza com a finalidade de transmitir por meio de uma reprodução artificial a “alma” das plantas para seu mobiliário. (BÜRDEK, 2006). A natureza tornou-se um laboratório para análises que pretendiam explicar o sistema do mundo como um todo por meio de fundamentos de base da filosofia natural (HENRY, 1998). Dessa maneira, surgiram os primeiros SG's inspirados nas observações dos elementos naturais como nuvens, montanhas, flocos de neve, galáxia e plantas (FISCHER; HERR, 2001). A curiosidade pelo desconhecido natural ganhou mais notoriedade, a evolução material em busca da modernidade e um questionamento dos costumes sociais da época passaram a

---

1 Tradução: A Origem das Espécies.

incorporar diversos estudos. Esta evolução tornou-se potencializada com o surgimento das ferramentas digitais (FISCHER; HERR, 2001). Burdek (2006) afirma que “a passagem do análogo para o digital não se limita a uma tecnologia e sim a uma verdadeira revolução cultural.” Diante disso, com o advento da tecnologia digital, surgiram os primeiros estudos acerca da combinação dos SG’s nos processos de projetos assistidos pelo computador (CELANI, VAZ E PUPO, 2013). Com isso, intensificou-se o desejo da utilização dos artefatos digitais, e por consequência potencializaram-se os estudos da aplicação dos SG’s como ferramentas de projeto no meio digital.

### **2.2.2 Contexto digital**

O conjunto do desenvolvimento da ciência da computação, inteligência artificial e a pesquisa operacional, unidas aos já conhecidos conceitos matemáticos e biológicos, impulsionaram os SG’s como ferramentas para a soluções de problemas (MARTINO, 2015). Este avanço deu-se em primeiro momento, a partir das transformações resultantes da revolução tecnológica, que foram impulsionadas pela Primeira Guerra Mundial. Conforme destaca Isaacson (2014) os principais motivos:

O desenvolvimento das válvulas termiônicas para a indústria do rádio preparou o caminho para a criação dos circuitos eletrônicos digitais. Isso foi acompanhado por avanços teóricos na lógica que tornaram os circuitos mais úteis. E a marcha foi acelerada pelos tambores da guerra. À medida que as nações começaram a se armar para o conflito iminente, ficou claro que o poder de computação era tão importante quanto o poder de fogo (ISAACSON, 2014).

Os países dedicaram-se ao investimento de novas pesquisas a fim de instrumentalizá-los para a um melhor gerenciamento automático do campo de batalha, conseqüentemente estimulando o advento tecnológico (MATTELART, 2002). O período Pós-Guerra trouxe ao mundo um pensamento de renovação de significados em diversas áreas. Os recursos tecnológicos resultantes do período da guerra estabeleceram um novo aspecto comportamental da união da computação e projeto (HENRIQUES, 2013). Com isso, na década de 1960, a computação atingiu seu marco histórico principalmente pelo surgimento e desenvolvimento da indústria dos computadores pessoais (ISAACSON, 2014). Com a popularização do dispositivo pessoal, romperam-se as barreiras da manipulação e controle destes produtos, que eram utilizados apenas por uma classe seleta, motivando a utilização da ferramenta



aos da década passada, porém, pouco utilizados pelos projetistas pelo alto custo e complexidade de uso; nos anos 80, na terceira geração dos recursos CAD, em conjunto com a popularização da utilização dos computadores pessoais com sistemas de 32 bits, impulsionaram a utilização deste recurso em projeto, e demarcaram o manifesto da ferramenta em escritórios e universidades; por fim, na quarta geração, nos anos 90, através da popularização de *softwares* dedicados ao uso do desenho assistido pelo computador, consolidou a prática do método entre os projetistas. Com isso, o computador foi instrumentado como uma ferramenta básica na formulação do processo de projeto e obteve um grande avanço do seu uso no século passado, Henriques e Passaro (2016, p. 4) ponderam sobre esta questão:

No início dos anos 90 o computador começou a ser utilizado como parte do processo criativo surgindo processos generativos como o Morphing, modelação paramétrica, sistemas evolutivos em que computador passou a ser utilizado em projeto para encontrar soluções múltiplas, que não eram previsíveis a priori. Deixa assim de ser utilizado apenas na fase final de projeto.

Neste contexto a primeira aparição dos SG's assistidos pelo computador aplicados no processo de projeto deu-se a partir da concepção da sede da Nunotani Corporation, em 1992, projetada pelo arquiteto Peter Eisenman. O arquiteto norte americano Greg Lynn também foi um dos percursores na utilização do sistema generativo no processo digital. O Arquiteto utilizou, até então inéditas ferramentas de animação, splines e NURBS (non-uniform rational basis splines) (AGKATHIDIS, 2016, p. 15).

Contudo, no início dos anos 2000, Branko Kolarevic (2003) foi um dos principais pesquisadores da integração digital entre os modelos CAD e processos generativos. Nos estudos, descreveu a evolução histórica das aplicações destas ferramentas nos últimos quarenta anos e, principalmente, demarcou e enumerou as técnicas de fabricação digital oriundas dos maquinários com tecnologia CNC<sup>3</sup>, destacando seus tipos de técnicas produtivas, como, aditivas, subtrativas (2D e 3D) e formativas (HENRIQUES, 2013). Os estudos de Branko Kolarevic foram importantes para a contextualização e introdução destas técnicas em meios acadêmicos, a fim de despertar o interesse de projetistas pelo tema na academia, porém não formalizou um

---

3 Usinagem controlada por comandos numéricos através da automação (KOLAREVIC, 2003).

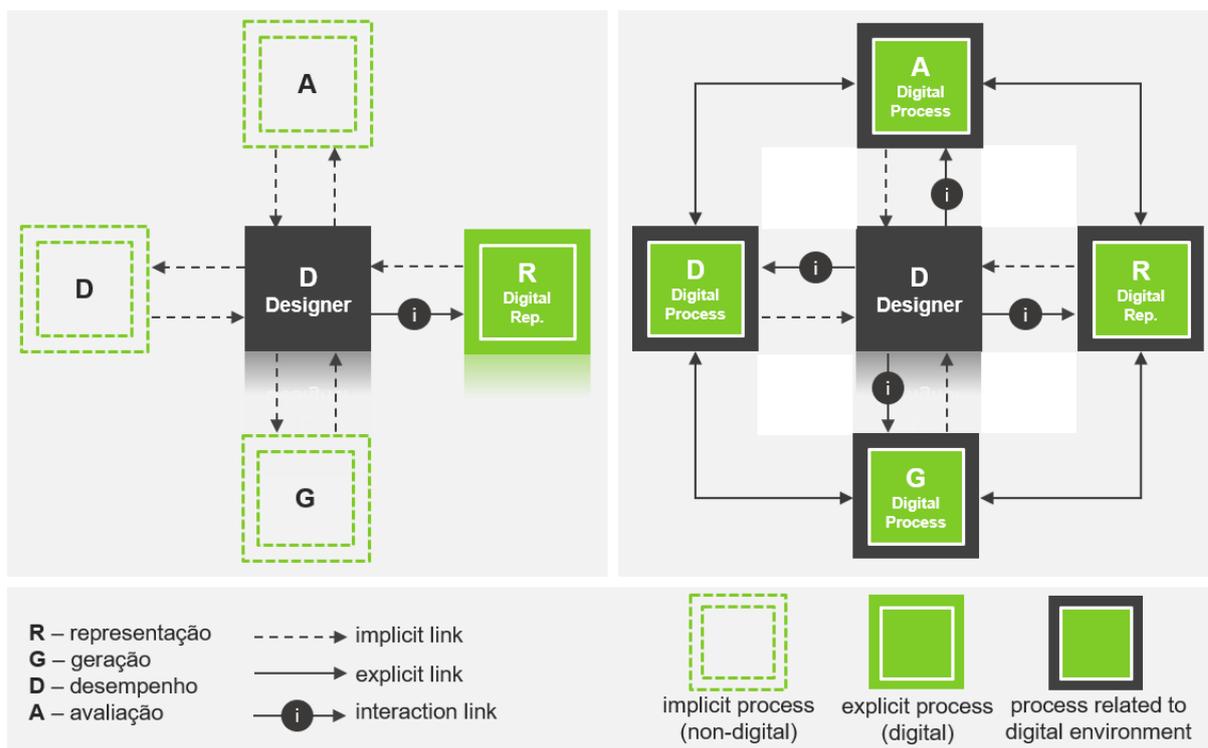
modelo teórico que interligasse os processos de projeto em meios digitais (KOLAREVIC, 2003).

Com isso, Rivka Oxman (2006) foi uma das precursoras dos estudos teóricos sobre a inserção dos recursos tecnológicos. Oxman retratou em seu artigo "*Theory and design in the first digital age*" a relação entre o projetista e os processos de projetos através do uso de ferramentas digitais. Para isso, criou um modelo taxonômico para descrever tal relação. Oxman (2006), defende a centralidade simbólica do designer na tomada de decisão projetual. No entanto, a natureza da interação do projetista com os meios digitais passa a modificar-se diante de novas possibilidades ofertados por estes meios.

A teoria torna-se importante para os SG's pois retrata a capacidade das ferramentas digitais com as quais o projetista passa a interagir, controlar e moderar processos e mecanismos generativos e performativos. Estes mecanismos se tornam novos materiais para a inclusão da ideia do projetista como um construtor de ferramentas (CELANI, VAZ E PUPO, 2011).

No entanto, os meios digitais permitiram novas abordagens, para a exploração de novas formas, geometrias e maneiras de formalização de uma ideia. A autora designou este novo modelo de formação apostro, ao anterior modelo de representação. Para isso, Oxman propõe um modelo (Figura 9) que possui quatro processos em um componente composto por diferentes classes: R-representação, G-geração, D-desempenho e A-avaliação. As propriedades de cada componente e a sua interação com o usuário foram definidas, graficamente, através de diferentes limites, descrevendo a direção das interações existentes. Oxman propôs dois tipos de interação entre usuário e processo: unidirecional e bidirecional. Definiu também as propriedades formais das interações, conforme as interações fossem implícitas ou explícitas, apresentando graus diferentes de formalização.

**Figura 9 – Modelo de processo digital de Oxman.**



Fonte: adaptado de OXMAN, 2006.

O modelo do processo de projeto de Oxman, serve como base para o entendimento dos SG's como ferramenta no meio digital, pois retrata a importância da criação do processo como um todo e não mais a representação como centralidade no projeto (HENRIQUES, 2013, p. 62).

Diante a esse contexto, destaca-se no Quadro 3 uma síntese de alguns destes modelos de projeto, desde a concepção analógica aos modelos CAD. Como descrito anteriormente, ao longo dos anos o processo digital modificou-se conforme o avanço tecnológico e cada vez mais integraram-se os níveis de projeto, desde o nível básico descritivo de representação, até um complexo modelo composto, envolvendo um processo generativo com mecanismos avaliadores e otimizadores (KOWALTOWSKI, 2011).

**Quadro 3** – Síntese de modelos de projeto analógicos e digitais.

Modelos de projeto	Descrição
Modelo de papel	Interação exclusivamente não digital;
Modelo de CAD descritivo	Interação com modelo CAD apenas na representação;
Modelo de avaliação generativa	Uso do modelo com técnicas analíticas de simulação;
Modelo de formação	Interação dinâmica de representação com uso de projeto paramétrico e scripts;
Modelo generativo	Interações complexas na geração formal;
Modelo performativo (formação)	Mecanismo de formação com manipulação para um determinado desempenho;
Modelo performativo (geração)	Mecanismo de geração com manipulação para um determinado desempenho;
Modelo composto	Combinação de todos os modelos

Fonte: adaptado de KOWALTOWSKI, 2011.

Diante disso, na esfera destes modelos surgiram as primeiras nomenclaturas e divisões dos SG's. No primeiro momento foram por meio de implicações de diferentes estágios do conhecimento, esta separação conforme Fisher e Herr (2003) pode ser descrita por dois grupos: o primeiro com o objetivo de reprodução (para transcrever algum produto já conhecido) e com objetivo de inovação (sendo esta com a função de gerar novos resultados e ferramentas inspiradas em diversas técnicas). Que pode ser descrito em:

- a) sistemas emergentes (auto-organização de imagem, som, animação, comportamento e forma, ex.: autômatos celulares<sup>4</sup>);
- b) gramáticas generativas (ex.: L-systems<sup>5</sup>, gramática da forma<sup>6</sup>);
- c) algoritmos (imagem, som, animação e forma, ex.: fractais, design paramétrico, mapeamento de dados).

<sup>4</sup> O sistema pode ser definido como um tipo de modelagem algorítmica introduzida em ambientes virtuais, que possui a função de simular ações e interações entre os indivíduos em um sistema global (ARAUJO, 2018, p. 71).

<sup>5</sup> São sistemas de reescrita paralela inspirados em organismos multicelulares, com o objetivo de criar uma cadeia de símbolos através de um conjunto de regras (KARI, et.al, 1997).

<sup>6</sup> A gramática da forma caracteriza-se como um sistema de geração formal que envolve métodos indiretos de símbolos e operações matemáticas para a criação de um conjunto de regras a fim de analisar composições visuais (KINIGHT, 2001; MENDES, 2018, p. 41).

Já o segundo grupo, destaca-se pelas técnicas ditas inovadoras, porém com maior grau de exigência matemática e lógica do projetista. Estas técnicas são geralmente utilizadas para a criação avançada de sistemas que produzem, testam e avaliam inúmeros resultados, sendo estas:

- a) mapeamentos de dados com uma técnica de geração de símbolos;
- b) desenho paramétrico como ferramentas de interpretação de símbolos;
- c) programação generativa (ex.: ferramentas de desenvolvimento, linguagens e técnicas de inteligência artificial).
- c) estética generativa (ex.: abstração, expressão simbólica, interpretação, retórica generativa, reconhecibilidade, repetitividade, acidentes e elementos do acaso, integração do sistema generativo com o contexto do design tradicional);

Estudos mais recentes que foram adotados nesta pesquisa pela relação do contexto racional e natural, resgatam estas classificações com próximos e similares conceitos. Como por exemplos, os estudos de Celani (et. al.; 2013 apud; KNIGHT, 2011), que buscam classificar os sistemas generativos por meio da separação de dois grupos: os sistemas baseados na lógica; e os sistemas inspirados na biologia.

Baseados na lógica:

- a) Simetria<sup>7</sup>;
- b) Combinatória<sup>8</sup>;
- c) Projeto paramétrico;**
- d) Grafos<sup>9</sup>;
- e) Gramática da forma<sup>10</sup>.

Inspirados na biologia:

---

<sup>7</sup> Pode ser definida como como todo tipo de composição em que existe uma repetição ordenada de partes ao longo de eixos ou ao redor deles. (CELANI, 2013, p. 1)

<sup>8</sup> Nos sistemas utiliza-se a combinatória para produzir diferentes soluções através de um processo exaustivo de permutação dos elementos (CELANI, et.al, 2013).

<sup>9</sup> Podem ser utilizados, por exemplo, para obter um melhor resultado funcional, oriundo de representações esquemáticas e topológica entre elementos (CELANI, et.al, 2013).

<sup>10</sup> Caracteriza-se em ser um sistema de geração formal, generativo ou analítico, a partir da substituição de um símbolo inicial (STINY E GIPS, 1976).

- a) Fractais<sup>11</sup>;
- b) Automatos celulares;
- c) Algoritmos genéticos;
- d) Algoritmos evolutivos.**

Sobretudo, dentre os vários SG's optou-se por trabalhar com os métodos da modelagem paramétrica e os algoritmos evolutivos, uma vez que esses processos são compatíveis com a problemática levantada neste trabalho. A escolha do método paramétrico deu-se pela possibilidade da criação de um processo totalmente integrado e interligado por meio do uso de parâmetros e variáveis, já o evolutivo deu-se pela criação de processos de exploração, geração e otimização de alternativas.

### 2.2.3 Desenho paramétrico

Na Era Digital, o Desenho Paramétrico é aquele que permite desenhar e modificar todos os componentes de um edifício a partir de parâmetros. O desenho paramétrico permite definir e interagir com a geometria de um elemento construtivo contido num modelo digital a partir de parâmetros, regras, funções, restrições e interdependências entre suas partes componentes, e/ou entre elementos construtivos (FLORIO, 2014).

Na matemática toda a forma paramétrica remete a valores que podem ser atribuídos a uma determinada variável, criando diferentes soluções para um problema através de uma única fórmula (CELANI, 2003). Estes valores, podem ser chamados de parâmetros, e por meio de regras, possibilitam a criação de relações entre elementos (FLORIO, 2012). Os parâmetros não são somente números relacionados com a geometria cartesiana, eles também podem ser referenciados através de critérios estruturais, performativos, estéticos etc. (BURRY; J. BURRY, M, 2010). De acordo com Kolarevic (2005, p.25), a modelagem paramétrica é uma poderosa ferramenta que tende a substituir um processo tradicional estável de projeto para um processo variável de projeto. Em outras palavras, o processo paramétrico é concebido pela criação de modelos de atributos fixos ou atributos variáveis, este modelo pode gerar possibilidades de modificações a seus componentes ao longo do processo. Com isso, torna-se possível a alteração destes valores em virtude da utilização de uma

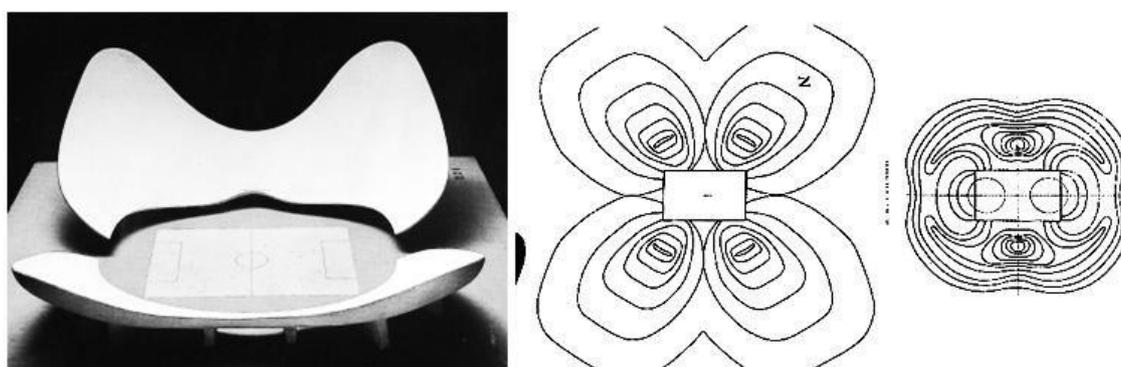
---

<sup>11</sup> São constituídas por meio de iterações de regras simples, com a propriedade de repetição como a principal característica (SEDREZ, 2018).

metodologia lógica de produção de soluções, ou seja, através da criação de um conjunto de regras. O projetista é capaz de modificar os valores iniciais ou finais sem que todo o processo se perca.

Ao longo da história, o desenho paramétrico ganhou sua primeira definição no ano de 1940 com o arquiteto Luigi Moretti, a partir do termo “Architettura Parametrica” (FRAZER, 2016). No período anterior à popularização das ferramentas digitais, Moretti conduziu diversas pesquisas que demarcaram a relação da arquitetura e design com equações matemáticas (HEIDARI, SAHEBZADEH, apud, MORETTI, 1951). O arquiteto definiu que a relação dos parâmetros deve ser apoiada pelas ferramentas e técnicas oriundas da lógica e matemática, estas assistidas pelo computador. Destacou que o mesmo, fornece a possibilidade de realizar o processo da resolução dos resultados (TEDESCHI, 2013). Conseqüentemente, em 1960, Moretti tornou-se um dos precursores a unificar o conceito do modelo paramétrico assistido pelo computador (TEDESCHI, 2013; FRAZER, 2016). O arquiteto projetou um modelo de estádio derivado de um desenho com dezenove parâmetros (Figura 10), que podem sofrer modificações dimensionais e ainda sim mantem-se sua característica inicial.

**Figura 10** – Modelo paramétrico de um estádio de futebol desenvolvido por Moretti.



Fonte: Heidari, Sahebzadeh, 2018, apud Bucci, Mulazzani, 2002.

Já no início dos anos 80, a partir do advento dos recursos CAD e os avanços das tecnologias digitais, surgiram os primeiros ambientes paramétricos (FLORIO, 2012) (HENRIQUES E BUENO, 2010). A partir de então, criaram-se diversos softwares, como: Nemetschek Allplan®, Graphisoft® ArchiCAD® e Autodesk

AutoCAD®, fazendo com que o recurso do desenho assistido por computador atingisse um grande crescimento (TSE, et.al., 2013).

Neste contexto, a modelagem geométrica assistida pela computação sofreu um importante avanço, principalmente pelo controle geométrico das curvas por meio da descoberta da *spline*. Com isso, a manipulação das curvas tornou-se mais contínua e suave, possibilitando um desenho mais livre e fluído. Posteriormente, as curvas *spline* foram substituídas pelas curvas NURBS (HENRIQUES, 2013). Tal substituição possibilitou um significativo avanço na modelagem geométrica (FLORIO, 2012). Devido ao fato de que as NURBS serem definidas como um tipo de *spline*, porém, com uma manipulação de pontos que não estão obrigatoriamente na curvatura, somente no início e fim da curva, o que torna o processo ainda mais fluído (KOLAREVIC, 2005). Isso deve-se a um cálculo de equação polinomial que assegura a continuidade da curvatura (HENRIQUES, 2013).

Além destes avanços, destaca-se também o surgimento de linguagens de programação mais simples, o que possibilitou a criação de novos *softwares* de manipulação algorítmica em ambientes de projeção. Diante disso, o desenho paramétrico disseminou-se a partir da década de 2010, devido a melhorias de hardware e software, e posteriormente ganhou mais relevância por meio da aplicação dos sistemas BIM (Building Information Modeling) (GARBER, 2009, p. 8). Tais fatores abriram portas para um pensamento mais algorítmico no processo de projeção, contudo, também houve a necessidade de um entendimento maior da lógica computacional e programação (MARTINO, 2015).

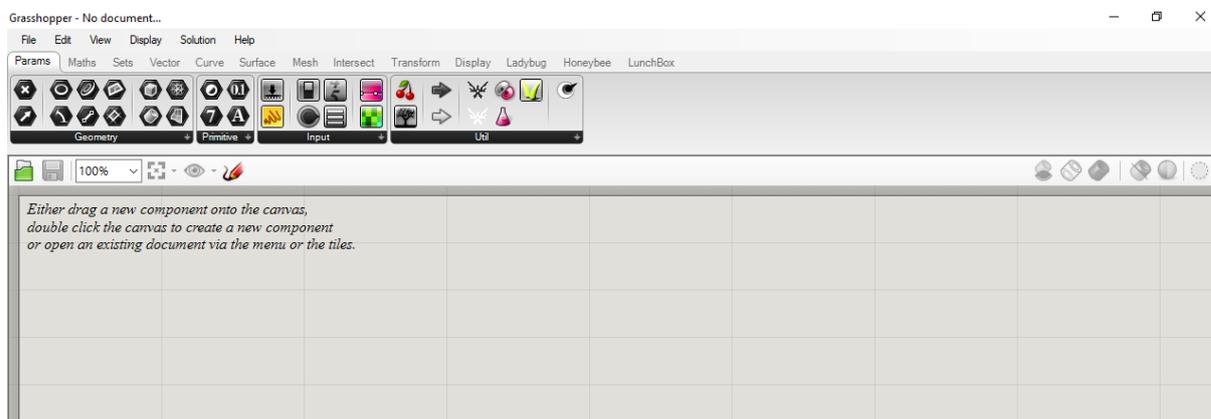
Sobretudo, os projetistas em suma não estão familiarizados com o uso de ferramentas script mais robustas. Diante disso, alguns softwares surgiram para facilitar tal compreensão por meio de um ambiente mais intuitivo. Destaca-se alguns exemplos como o *software* Autocad® que utiliza ambientes de programação mais amigáveis, por meio de um código textual para a criação de linhas de comando. Outros *softwares* também utilizam o script para a geração de modelos geométricos, entre eles o *Rhinoceros*® com o *Rhinoscript*®, o *Maya*® com o *MEL*® e o *3DMax*® com o *MaxScript*®. Contudo, outro método para a criação de formas geométricas através do uso da programação é formado por meio da utilização de "pacotes", estes podem ser definidos como componentes visuais que já possuem configurações e funções

previamente definidas (MARTINO, 2015). O *plug-in Grasshopper®* para o *Rhinoceros®* utiliza estes componentes, com isso, torna o processo mais intuitivo para o uso dos projetistas que não são programadores e por consequência foi a ferramenta escolhida para esta pesquisa.

### 2.2.3.1 Grasshopper

A ferramenta *Grasshopper®* funciona como um editor gráfico de modelagem algorítmica, que apresenta componentes visuais que facilitam a programação (MARTINO, 2015). A interface da ferramenta (Figura 11) é dividida em quatro seções, entre elas: a barra de menu, com operações básicas para abrir, salvar ou importar algum documento. Conjunto de abas para: personalizar a barra de comandos; selecionar componentes (onde encontra-se todos os componentes necessários para a elaboração do algoritmo); a barra de ferramentas para a mudança de visualização dos modelos; e a tela de trabalho para a manipulação e edição da programação do algoritmo.

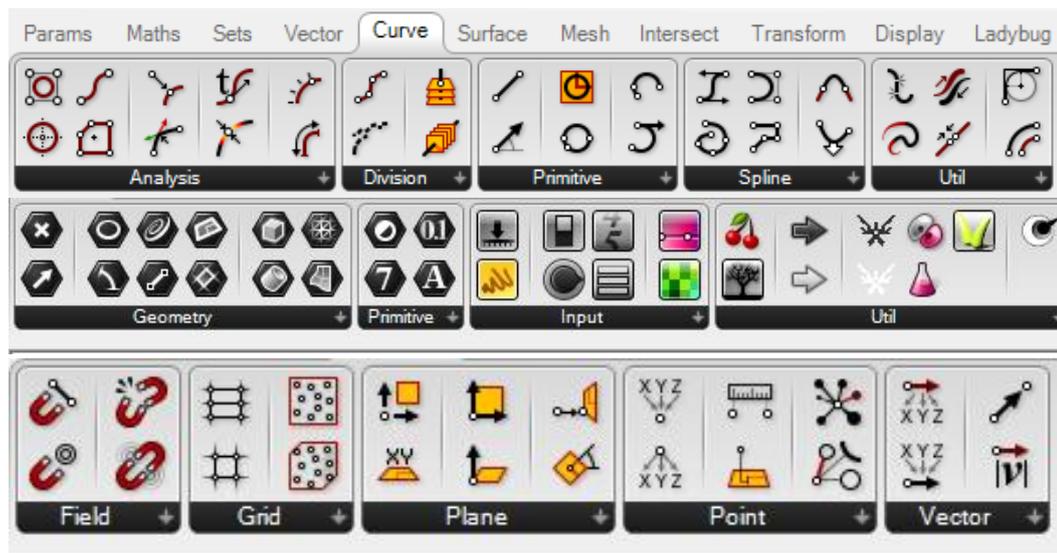
**Figura 11** – Interface da ferramenta *Grasshopper®*.



Fonte: acervo do Autor.

Na aba dos componentes (Figura 12), encontram-se as categorias que são organizadas por meio de critérios de funcionalidade e tipologia de cada comando. Todas estas categorias possuem subdivisões específicas e que facilitam a procura do componente. Por exemplo, a aba *Maths* possui uma série de agrupamentos para a realização de operações matemáticas, como multiplicação, adição, subtração etc. Uma alternativa para a escolha do componente, pode ser realizada por meio da digitação do nome do comando.

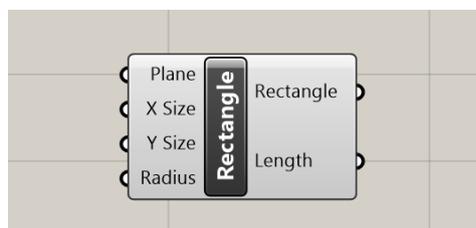
Figura 12 – Menu de componentes da ferramenta *Grasshopper®*.



Fonte: acervo do Autor.

Os componentes (Figura 13) apresentam duas características importantes: o *input* e o *output* (com exceção de alguns). Estes elementos, são dados de entrada e saída de informação. Como exemplo, no componente *rectangle* o *input* (sempre a esquerda) dispõe de quatro variáveis, entre elas: *plane*, com a função de demarcar a localização do retângulo em relação a um plano; *X Size*, para a escolha da dimensão do retângulo no eixo X; *Y Size*, para a escolha da dimensão do retângulo no eixo Y; e *Radius*, com a finalidade de arredondar as arestas do retângulo. Estes dados após combinados resultam no *input* do componente, que no caso é o conjunto do resultado a partir combinação destas informações.

Figura 13 – Exemplo de um componente.

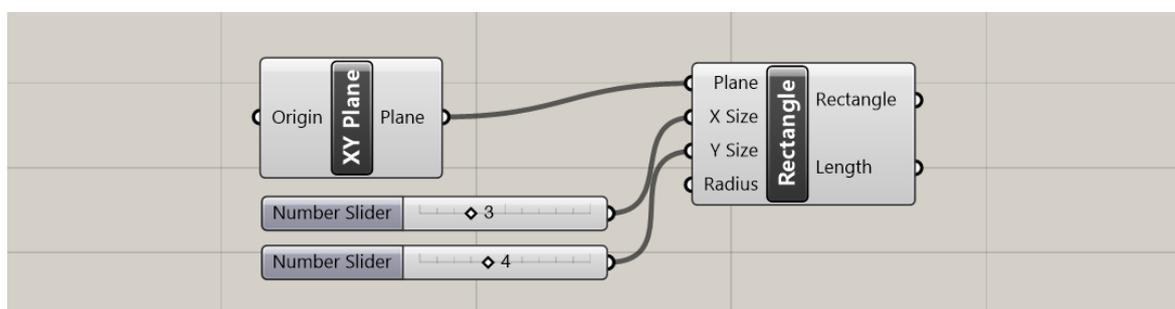


Fonte: acervo do Autor.

Quando as variáveis do *input* são quantificáveis, na maioria dos casos, podem ser preenchidas pelo componente *number slider* (Figura 14). Este comando serve para criar uma variação por meio de um conjunto numérico. Por exemplo, nas dimensões

X e Y, introduziu-se um conjunto numérico do valor 1 ao valor 5 para cada variável, com isso, estabeleceram-se parâmetros de limites da figura geométrica. Estes valores podem ser alterados em qualquer etapa da programação, fazendo com que a informação não seja perdida conforme o andamento da modelagem. Por essa razão, este comando é importante para a etapa da utilização do algoritmo evolutivo, para estabelecer o conjunto de limites dos objetivos buscados na otimização e avaliação ao longo do processo.

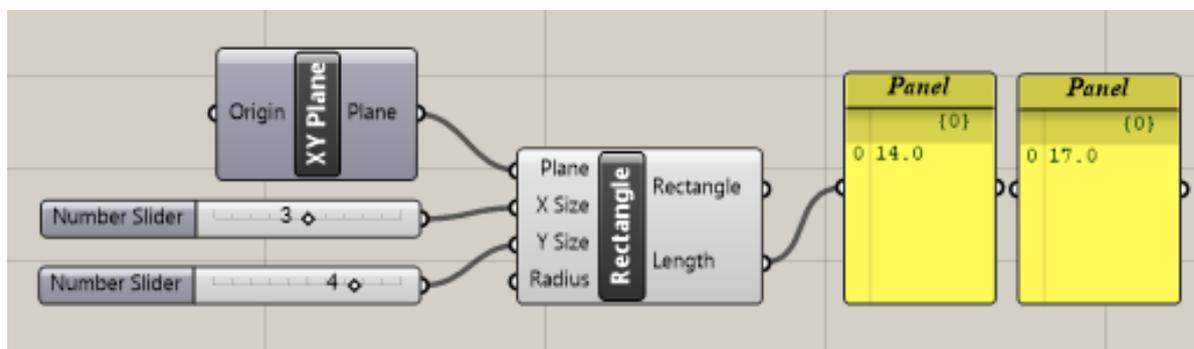
**Figura 14** – Conexões entre componentes.



Fonte: acervo do Autor.

O componente *panel* (Figura 15), é uma alternativa para a criação destes conjuntos número, porém, o comando possui uma numeração fixa, servindo na maioria das vezes como uma tabela de valores. Tanto para obter uma informação detalhada do componente, ou tanto para listar valores para certos elementos.

**Figura 15** – Utilização do componente *panel*.



Fonte: acervo do Autor.

Diante disso, os projetistas logo perceberam que programas mais sofisticados poderiam gerenciar a complexidade além das capacidades humanas, estruturando

parâmetros e procedimentos. Esse tipo de modelagem depende de linguagens de programação que expressam instruções de uma forma que pode ser executado pelo computador através de um procedimento passo-a-passo: o algoritmo.

#### 2.2.4 Algoritmos evolutivos

O termo algoritmo surgiu por meio de escritas realizadas pelo matemático persa Abdullah Muhammad bin Musa al-Khwarizmi (780 - ac. 850). Em 825, o matemático escreveu o livro “*Algoritmi de numero Indorum*” sobre cálculos com algarismos indianos (WAZLAWICK, 2016, p. 13). Contudo, foi no ano de 1935 a eclosão do algoritmo com Alan Mathison Turing<sup>12</sup> (1912-1954) um dos maiores matemáticos do seu tempo. Turing substituiu por meio de descobertas, a perspectiva da noção intuitiva de um determinado procedimento ou problema efetivo por uma ideia formal matemática (FONSECA FILHO, 2007, p. 74). Tal estudo resultou na criação do princípio técnico da “máquina universal”, que tinha como objetivo resolver e simular problemas por meio de processos algoritmos (ISAACSON, 2014).

O algoritmo é composto por variáveis que possuem a função de armazenamento de informação. Sendo entendido como uma receita ou técnica para criação de algo, e constituído por um conjunto finito de regras a fim de realizar a execução de alguma ação (TERZIDIS, 2006). O resultado desta ação ocorre devido a uma adição de informação das variáveis, que podem ser números inteiros, decimais, expressões booleanas<sup>13</sup>, valores alfanuméricos, ou curvas, superfícies e qualquer outra forma geométrica primitiva. Assim sendo, o algoritmo trabalha na organização destas ações, por meio da utilização de estruturas condicionais (HENRIQUES, 2013). Estes procedimentos são realizados através da execução de um conjunto de instruções ou comandos e, para a execução da operação desejada (MARTINO, 2015). Silva Jíunior (2016) destaca ainda:

Os algoritmos, quando utilizados como ferramenta de projeto, possibilitam a produção de um universo de soluções. Estas soluções são determinadas a partir das variáveis definidas para a formulação do sistema generativo. Desse modo as soluções resultantes são dependentes das regras e interações contidas no sistema (JÚNIOR, 2016).

---

12 Foi um matemático, lógico e cientista da computação britânico (FONSECA FILHO, 2007).

13 Álgebra descoberta por George Boole (1815 - 1864), descreve os circuitos que podem ser construídos pela combinação de portas lógicas (HENRIQUES, 2013).

Dessa maneira, com a finalidade de resolver problemas por meio de algoritmos, deram-se início aos estudos sobre a ligação da biologia com a computação, e conseqüentemente, o processo de seleção natural de Darwin como uma classe de algoritmos (FLORES; SCHULER, 2008). Com isso, abriram-se as portas para estudos relacionados com a evolução genética, a qual resultou na base teórica que deu origem aos algoritmos evolutivos (MARTINO, 2015).

Os algoritmos evolutivos podem ser definidos como um conjunto de métodos que possuem como característica o uso de referências comportamentais da natureza como auto-organização e comportamento adaptativo (BITTENCOURT, 1996; MARTINO, 2015). Em outras palavras, pode-se dizer que os algoritmos evolutivos utilizam técnicas e processos genéticos adaptáveis, cuja finalidade é a solução de problemas complexos. Os algoritmos evolutivos são derivados de três diferentes abordagens, entre elas, os algoritmos genéticos, introduzidos por John Henry Holland<sup>14</sup> (1929-2015), as estratégias evolutivas, propostas por Ingo Rechenberg<sup>15</sup> e Schwefel<sup>16</sup> e a programação evolutiva, fruto de estudos de Fogel (ZUBEN, 2000).

John Henry Holland foi o precursor ao desenvolver as primeiras pesquisas relevantes sobre o tema. A publicação do “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*” foi um marco nos estudos dos Algoritmos Genéticos (POZO et al., 2011). Holland desenvolveu os algoritmos genéticos, baseado em processos naturais de sobrevivência e reprodução de populações. Holland considerou a evolução natural como um processo robusto, simples e poderoso e através desta inspiração tornou os processos de soluções computacionais mais eficientes (GABRIEL, DELBEM, 2008). O principal funcionamento dos algoritmos genéticos baseia-se no tratamento por meio da recombinação de soluções a fim de construir melhores resultados (POZO et al., 2011). Já Lawrence Fogel<sup>17</sup>, tinha como princípio a técnica para usar a teoria da

---

14 Foi um cientista e professor americano, sendo pioneiro nos estudos sobre sistemas complexos e ciência não-linear.

15 Cientista da computação e professor alemão, um dos principais estudiosos do campo da computação evolucionária e da evolução artificial.

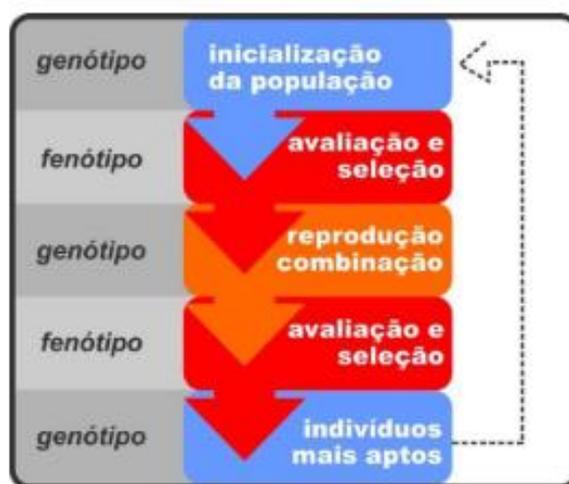
16 Cientista da computação, pioneiro em estudos sobre computação evolutiva e estratégias da evolução.

17 Foi um engenheiro, conhecido como o pai dos estudos da programação evolutiva, entre outros estudos como, cibernética, inteligência artificial e teoria da comunicação (HUMPIRI, 2005).

evolução como um mecanismo de inteligência artificial. Por meio da utilização da mutação genética dos indivíduos (HUMPIRI, 2005). Diante disso, estudou a programação evolutiva. Por fim, no ano de 1964, o terceiro método foi desenvolvido pelo estudante de Engenharia, Ingo Rechenberg (HUMPIRI, 2005). Diferentemente da programação evolutiva, o método conhecido como estratégias evolutivas utilizou os operadores de diversidade mutação e a recombinação, com a ideia de prevalecer a permanência dos indivíduos que possuíam boa avaliação dentro da população. Entretanto, mesmo que estas abordagens possuam criações independentes, o termo algoritmo evolutivo é a denominação mais comum para união destes processos, pois as abordagens possuem a estrutura algorítmica em comum (MICHALEWICZ, 1996).

De modo geral, o algoritmo evolutivo comporta-se da seguinte maneira: primeiro, a geração de uma população por meio de critérios desejados ou aleatórios, segundo, a seleção das melhores alternativas, terceiro, a mutação destes indivíduos visando a otimização das alternativas e se necessário, a criação de uma nova geração por meio da recombinação da população inicial (Figura 16).

**Figura 16** – Estrutura de funcionamento de um algoritmo evolutivo.



Fonte: Martino, 2015.

Neste contexto, destaca-se a terminologia dos algoritmos evolutivos que são amplamente inspirados na evolução natural, (LINDEN, 2006). Nem todos os termos são expostos na presente pesquisa, assim como, não há também uma definição

universal para estas terminologias, e sim, um consenso dos termos mais utilizados pelos principais autores da área.

**População inicial:** A população pode ser definida por meio de um conjunto aleatório de indivíduos a fim de criar um grupo de soluções, este grupo pode ser analisado novamente para a criação de um novo conjunto de indivíduos (POZO et al., 2011). O algoritmo vai produzir automaticamente estas soluções conforme a modelo programado pelo projetista (MARTINO, 2018, p. 89). O desempenho do algoritmo pode variar conforme o tamanho da população escolhida, menores populações podem gerar pequenas chances de melhores soluções, entretanto grandes populações necessitam de maiores recursos computacionais e, por consequência, maior tempo de processamento (POZO et al., 2011).

**Mutação e recombinação:** Dentro dos algoritmos evolutivos, as alterações entre os “indivíduos pais” que originam os “indivíduos filhos” são realizadas por operadores de diversidade (MARTINO, 2018, p. 90). Dentre os operados mais comuns, destacam-se, a mutação e a recombinação (MICHALEWICZ, 1996). A mutação age como um operador para criar uma variação extra na população, para isso são criados valores pequenos na taxa de mutação para que o progresso do algoritmo não seja alterado drasticamente (ZUBEN, 2000). A recombinação, diferentemente da mutação, mantém as características familiares entre os indivíduos, este operador relaciona-se com o processo de cruzamento e realiza trocas entre dois ou mais cromossomos a fim de transferir características de um indivíduo para outro (MARTINO, 2018, p. 91).

**Avaliação e seleção:** Os operadores de avaliação e seleção dos algoritmos evolutivos são realizados através da simulação da seleção natural (MARTINO, 2018, p. 91). O operador de avaliação é o responsável pela verificação do grau de qualidade de um indivíduo referente a solução do problema (LINDEN, 2006, p. 31). O processo de avaliação também pode ser denominado como função objetiva ou *fitness function* (MARTINO, 2015). O operador de seleção é responsável pela classificação e seleção dos melhores indivíduos avaliados resultantes das características propostas previamente na avaliação, para isso é necessário estar claro todas as condições e restrições necessárias para solução do processo (MARTINO, 2018, p. 91).

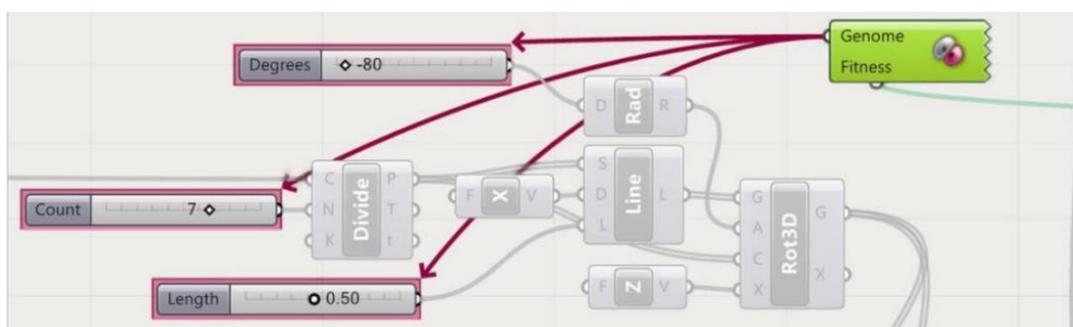
**Tempo de duração:** As condições da duração são muito importantes no processo do algoritmo evolutivo, é necessário tempo suficiente para o funcionamento dos mecanismos a fim de criar e avaliar as melhores estruturas genéticas para a obtenção das soluções mais adequadas (MARTINO, 2015). Para isso o período pode ser definido através de três processos: pela definição de um tempo máximo de processamento do computador por um número máximo de gerações ou pelo alcance dos objetivos desejados (MARTINO, 2018, p. 92).

Dessa maneira, nos itens a seguir, destacam-se as ferramentas utilizadas para a criação do algoritmo evolutivo. Com isso, foram escolhidas os plugins Galápagos e *Biomorpher*, ambos, possuem mecanismos que englobam os conceitos acima destacados.

#### 2.2.4.1 Galápagos

A ferramenta Galápagos, é um *plug-in* do *Grasshopper*® e corresponde ao processo simplificado dos algoritmos evolutivos. O componente (Figura 17) possui apenas duas conexões: o *Genome* (conjunto de genes) que são as predefinições dos parâmetros iniciais, por exemplo, altura, espessura, angulação, etc., estes valores devem ser representados pelo componente *number slider* que corresponde ao conjunto numérico entre um valor mínimo e máximo de uma variação para delimitar o campo de soluções. A outra conexão chamada de *fitness* relaciona-se com os critérios de avaliação (*fitness function*) ou seja, o componente expressa as condições mínimas e máximas desejadas no processo algorítmico.

**Figura 17** – Conexões do componente Galápagos.



Fonte: MARTINO, 2015.

O componente simula por meio de parâmetros pré-definidos e realiza a classificação dos melhores indivíduos. Para isso, na aba superior do gráfico, exemplo na Figura 18, retrata-se o indivíduo mais apto de cada geração, sendo que o melhor classificado fica exposto na borda superior do gráfico. No gráfico B, as piores soluções ficam destacadas na cor preta e as melhores na cor vermelha, a proximidade entre eles corresponde ao grau de semelhança.

**Figura 18** – Gráficos de visualização da execução do algoritmo.



Fonte: MARTINO, 2015.

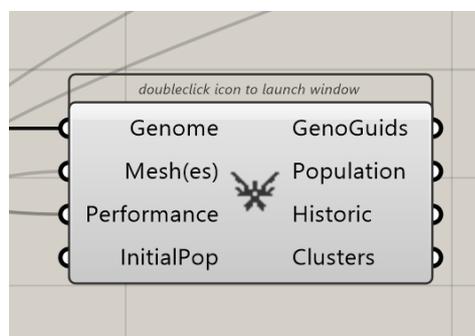
Já o gráfico C corresponde ao grau de semelhança de cada indivíduo. Por fim, o gráfico D apresenta a classificação das soluções referentes aos valores fitness, ou seja, o melhor indivíduo em relação aos critérios definidos no processo algorítmico.

#### 2.2.4.2 Biomorpher

O software biomorpher, foi desenvolvido pelo Engenheiro Handing (2018), devido à falta de ferramentas integradas ao *Rhinoceros®* e *Grasshopper®* com a função de integrar a modelagem a ambientes generativos de análises. A ferramenta Biomorpher, utiliza os mesmos conceitos do Galápagos, porém, com mecanismo e nomenclaturas distintas. A principal característica do *plug-in* é a visualização do

processo exploratório, a ferramenta utiliza a simulação das soluções dentro do espaço paramétrico definido pelo projetista. Para isso, no componente *Biomorpher* são dispostos quatro *inputs*, sendo eles: *Genome* (Figura 19), que possui a mesma função do *Galapagos*, ou seja, são predefinições dos parâmetros iniciais por meio da utilização dos *numbers sliders*; o *Mesh(es)* é o campo para demarcação da geometria utilizada para a visualização dos resultados na simulação; a *performance*, que é a *fitness function*, porém neste caso, possui a função de mensurar os resultados; e a *initialPop*, que tem por finalidade a indicação da quantidade de uma população inicial.

**Figura 19** – Componente *Biomorpher*.

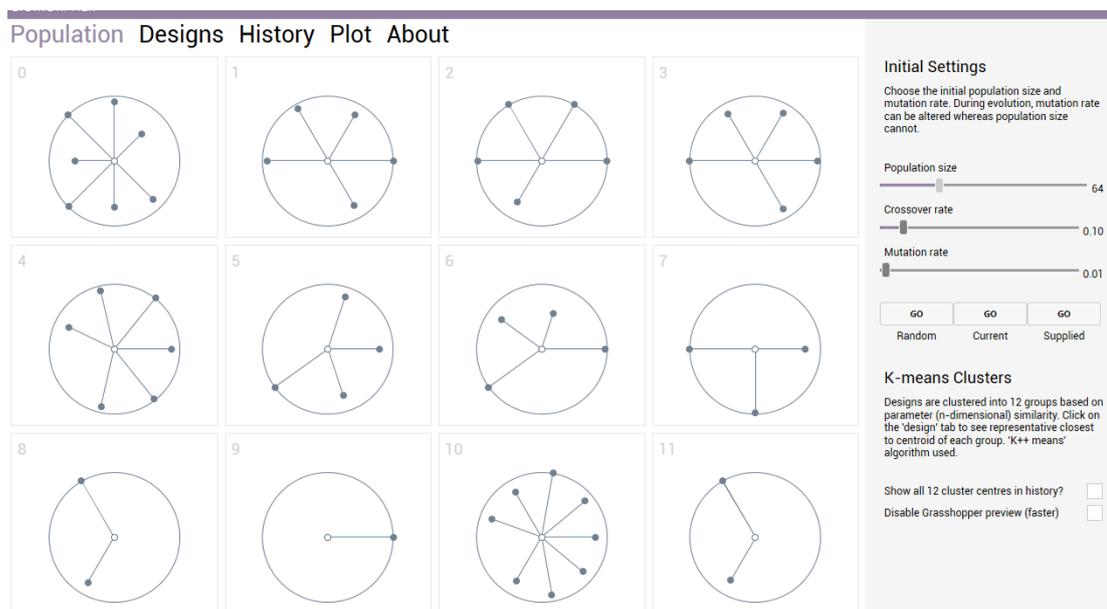


Fonte: acervo do Autor.

A interface do componente é composta basicamente pelas configurações iniciais do componente, em suma são as mesmas nomenclaturas utilizados no *Galapagos*, com distintas características. Sendo elas: A *population size*, ou seja, o tamanho da população total, porém, com intervalo entre 12 a 200; a *crossover rate*, sendo a taxa de recombinação dos indivíduos, com a finalidade de manter as características semelhantes entre as famílias; a *mutation rate* refere-se a taxa de mutação que é a estratégia que utiliza de um operador com probabilidades aleatórias para a escolha das características dos indivíduos.

Os demais comandos são responsáveis pela geração das famílias de resultados (Figura 20). Para isso, existem três possibilidades: *random*, com a finalidade de gerar uma população de forma randômica, em outras palavras, o algoritmo “escolhe” dentre os intervalos definidos pelos *number sliders* os parâmetros de cada população. O comando *current* que opera o cálculo utilizando os menores valores dos parâmetros iniciais.

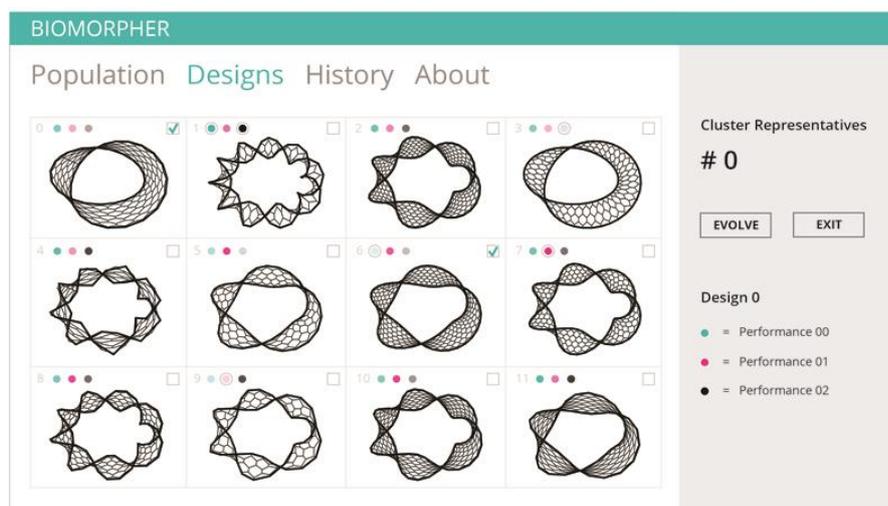
**Figura 20** – Disposição por semelhança dos grupos gerados.



Fonte: acervo do Autor.

Após a escolha da configuração inicial, o conjunto criado divide-se em 12 famílias, classificadas entre 0 a 11 e representadas por meios de gráficos que retratam a semelhança entre a população inicial, uma população de até 200 soluções, porém, com 12 grupos organizados conforme semelhança. A aba *designs* (Figura 21) tem por finalidade a visualização do modelo tridimensional destes conjuntos de resultados, também possui a função de gerar novas famílias, para isso o projetista deve definir qual família deseja fazer um cruzamento.

**Figura 21** – Visualização da população.



Fonte: Harding, 2018.

Outro fator importante para a nova geração são as performances definidas previamente no *input* do componente Biomorpher, com isso, geram-se novas possibilidades otimizadas por meio do critério adotado. Os valores para a modificações podem ser para o mínimo ou máximo desejado.

Com isso, após o entendimento destes conjuntos de ferramentas bem como os conceitos e termos utilizados, no item a seguir destaca-se o processo de materialização de um produto, ou seja, a fabricação digital por corte a laser.

### 2.3 FABRICAÇÃO DIGITAL: CORTE A LASER

“Novas formas de projetar, geralmente seguem acompanhadas, ou precedendo, novas formas de construir. Devemos destacar o desenvolvimento de sistemas de fabricação controlados por computador, os sistemas CNC (controle numérico computadorizado pelo IMT em 1951) bem como a popularização do uso dos computadores nas décadas de 1980 e 1990, que aceleraram a maneira como arquitetos e designers relacionavam-se com os meios digitais” (LEITE; MARTINS, sem ano).

A fabricação digital insere-se, como uma possível integração do processo de projeto como um todo, desde sua concepção à sua produção (NEVES, 2013). Historicamente a fabricação digital surge no ambiente acadêmico em áreas mais criativas no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) por intermédio de Neil Gershenfeld. O professor e cientista foi responsável pela disseminação da utilização de máquinas industriais entre estudantes de artes, arquitetos e designers (LOY, 2015). Gershenfeld impulsionou a eclosão da tecnologia criando o primeiro Laboratório de Fabricação, concentrado no espaço de pesquisas interdisciplinares Center for Bits and Atoms (CBA), e fundado em 2001 pela National Science Foundation (NSF). O centro de pesquisa teve como principal objetivo a criação de uma revolução tecnológica, principalmente na área da fabricação digital, democratizando o acesso a máquinas e técnicas inovadoras, criando uma concepção diferente na produção material (NEVES, 2013). Com isso, nos últimos anos, devido ao desenvolvimento impetuoso da computação esta democratização alcançou diversas áreas de projeto (PUPO, 2009).

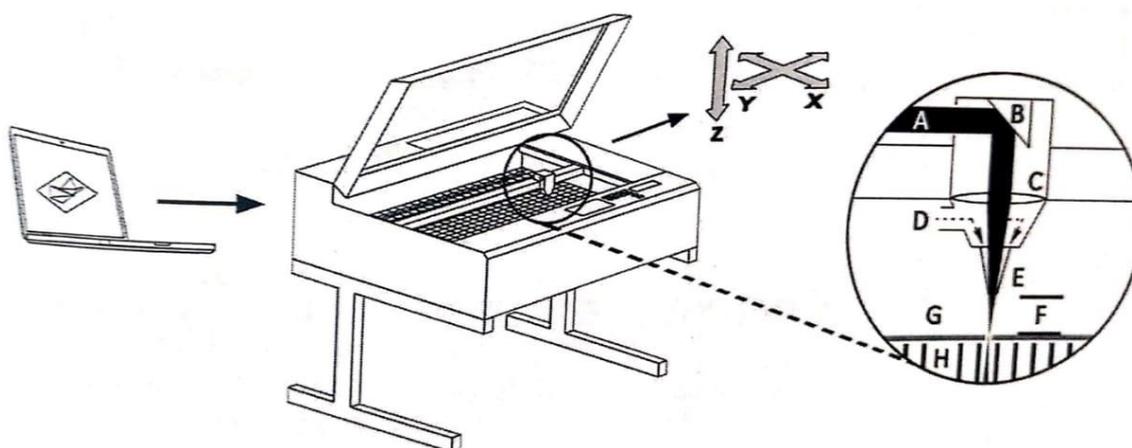
Neste cenário, surgiram diversos segmentos e métodos resultantes dos estudos sobre a fabricação digital. Dentre eles, destaca-se a divisão proposta por Pupo, 2009. A autora defende a ramificação em três estágios, quanto a finalidade, quanto ao número de dimensões e quanto a maneira que os objetos são produzidos. O primeiro segmento, subdivide-se em prototipagem digital ou fabricação digital. A primeira utiliza-se para estudos, avaliação e apresentação, por meio de uma maquete ou protótipo em escala 1:1. A segunda, retrata a produção final do produto, ou seja, a produção em série, peça única, pequena série. O segundo segmento, representa o número de dimensões desejadas para a fabricação do produto (fator importante para a escolha do maquinário a ser utilizado). E por fim, a terceira ramificação, divide-se em processos subtrativo, formativo e aditivo.

O corte a laser, encaixa-se na primeira divisão, sendo um processo de desbaste de material (PUPO, 2009). Ou seja, é um método subtrativo de fabricação, onde caracteriza-se pela remoção do material por dissolução ou desbaste da superfície da matéria prima (KOLAREVIC, 2003, VOLPATO 2007, NETO, 2018). Dentre os outros tipos de técnicas utilizados no método subtrativo, destacam-se: o corte por jato d'água (water jet), o corte a plasma, a fresadora, o corte por lâmina pulsante e o corte por fio aquecido (BARBOSA NETO, 2018).

Segundo Neves (2009) a cortadora a laser torna-se popular devido a sua fácil manipulação e simplicidade de execução, uma vez que, trabalha por meio de softwares que formam desenhos vetoriais populares, como o AutoCAD, CorelDraw e Illustrator.

A cortadora a laser é um equipamento baseado em comando número por coordenadas, que executa o corte do material por meio de um feixe a laser constituído por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sendo o seu movimento entre dois eixos (X e Y). Os componentes da máquina são basicamente (Figura 22): (A) feixe a laser, (B) conjunto de espelhos para rebatimento do feixe a laser, (C) lente, (D) entrada de ar, (E) feixe de focagem ótica, (F) regulagem do feixe de corte, (G) área de superfície para o material e (H) suporte de apoio do material (BARBOSA NETO, 2018).

**Figura 22** – Ilustração do sistema de uma cortadora a laser.



Fonte: Barbosa Neto, 2018.

De modo geral, as funções deste equipamento são o corte de: madeira, papel, papelão, acrílico, couro, tecido e feltro; ou a gravação de: alumínio, metal, pedra ou madeira (NEVES, 2013). Para a realização do corte ou gravação destes materiais, (principalmente pelos fatores da espessura) estes processos dependem da potência do laser, do número de eixos e do tamanho da área de trabalho (HAUSHILD; KARZEL, 2011). A potência do laser (parâmetro importante para esta pesquisa) é medida em Watts, e é diretamente relacionada com a velocidade da capacidade de operação da máquina. Quanto a espessura dos materiais, quanto maior for a mesma, maior será a potência a ser aplicada. Dentre os materiais mais utilizados, destaca-se o MDF, o acrílico e o papelão.

A utilização desses equipamentos na indústria pode variar desde a produção de protótipos em escala até o corte de tecidos para a confecção de roupas e calçados e a fabricação de peças metálicas. Como visto, segundo Pupo (2009) as cortadoras a laser realizam a produção de objetos em 2D, sendo necessário a posterior montagem das peças para a criação do objeto em formato 3D. Uma vez que os modelos digitais produzidos pela grande maioria dos projetistas são desenvolvidos em três dimensões, há a necessidade da planificação dos destes modelos, para que possam ser enviados à cortadora a laser. Tal técnica será explicada e utilizada posteriormente no item 3.1.1.

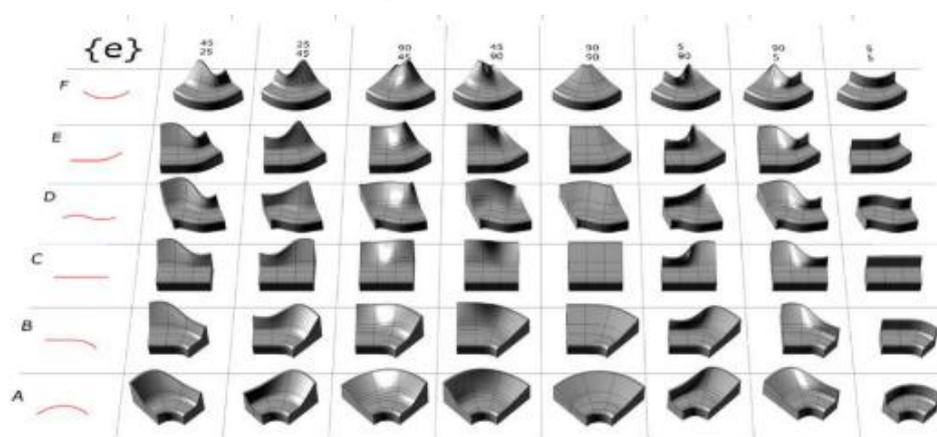
Com isso, em busca da compreensão e mapeamento da produção acadêmica na área, bem como a observação dos assuntos levantados neste trabalho, a seguir apresenta-se um tópico sobre o estado da arte sobre a presente pesquisa.

## 2.4 ESTADO DA ARTE

A presente pesquisa insere-se neste contexto, com a contribuição científica para otimização da etapa de exploração no processo de projeto de produto em design, por meio de ferramentas digitais associadas a métodos de sistemas generativos baseados na modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos orientados a fabricação digital por corte a laser. Buscando mapear a produção acadêmica realizada na área, bem como observar aspectos que vem sendo destacados e métodos empregados, a seguir apresenta-se um tópico sobre o estado da arte relacionado a este trabalho.

Vettoretti e Turkienicz (2011) retrataram a importância da utilização dos SG's por meio do projeto paramétrico (Figura 23). Os autores estruturaram parâmetros ergonômicos de usuários durante atividades de conversa e leitura em bancos públicos. Com isso, foram constituídas diretrizes formais associadas a dimensionamentos antropométricos oriundos da observação postural. O sistema paramétrico permitiu a criação de diversas alternativas formais por meio da gramática de forma assistida pelos *softwares Rhinoceros®* e *Grasshopper®*. A estratégia utilizada para a geração de formas foi por meio do fundamento matemático da geratriz e diretriz, com isso, criou-se um conjunto de regras para a combinação dos módulos (Figura 22) conforme os parâmetros iniciais coletados.

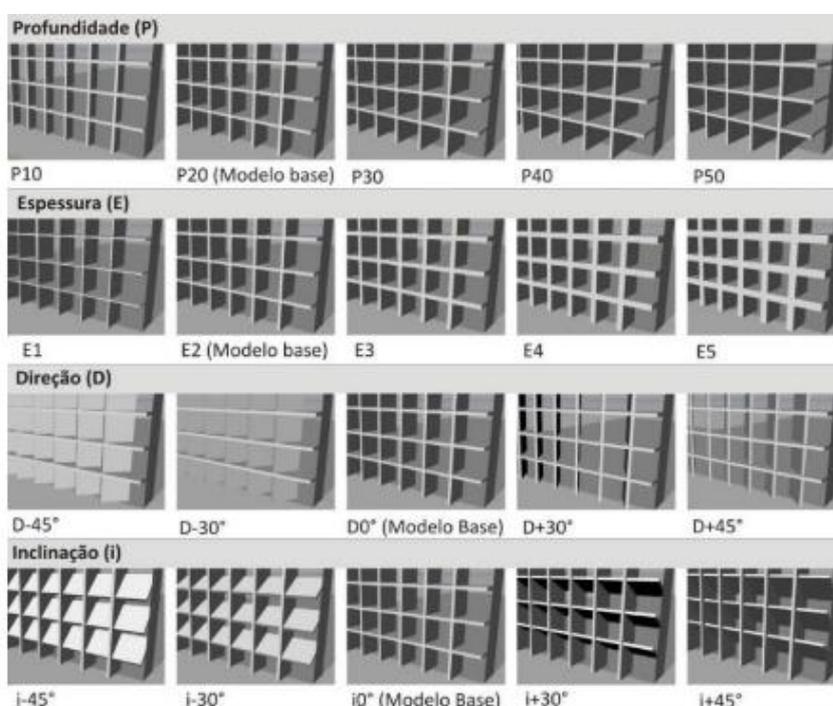
**Figura 23** – Sistema generativa e suas variações formais.



Fonte: Vettoretti e Turkienicz, 2011.

Cartana e Pereira (2016) apresentam o resultado de elementos de controle solar para uma fachada genérica (Figura 24), desenvolvidos por meio da utilização da modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos. Na primeira etapa da pesquisa, os autores realizaram a variação paramétrica do elemento base, assistido pelos softwares *Rhinoceros*® e *Grasshopper*®. As dimensões iniciais do modelo foram de 20cm para os espaçamentos verticais e horizontais, modificados conforme as variações (Figura) dos parâmetros dimensionais de profundidade (P), espessura (E), direção (D).

**Figura 24** – Variações paramétricas do elemento de controle solar.



Fonte: Cartana e Pereira, 2016.

Posteriormente, os autores realizam a simulação computacional referente à admissão de radiação solar e ao desempenho lumínico de cada elemento. Na etapa posterior, realizou-se a otimização por meio de algoritmos evolutivos dos resultados das simulações anteriores, os autores utilizaram o *plug-in* Galápagos associado à ferramenta de simulação *Diva-for-Rhino*. Nos resultados, obteve-se o primeiro conjunto de soluções referentes à admissão de radiação solar, os valores foram organizados em tabelas, onde destacaram-se os modelos P10 (profundidade 10cm) e P50 (profundidade 50cm), sendo o primeiro com maior nível e o segundo com maior de admissão de radiação solar entre os resultados. No grupo de resultados seguintes,

foram descritas as soluções referentes à otimização por meio de algoritmos evolutivos, os autores dividiram a simulação em três direções, oeste, norte e leste. Percebe-se a melhora na distribuição da admissão de luz natural e uma distribuição mais homogênea dos modelos otimizados, resultado da avaliação dos critérios demarcados no *fitness*. Com isso, destacam-se os elementos em que foram utilizados a otimização por meio da ferramenta Galápagos obtiveram melhores resultados em relação ao grupo avaliado. Com isso, demonstra-se a potencialidade da ferramenta para o auxílio na tomada de decisão em projeto.

Diversas pesquisas apresentam o uso dos sistemas generativos como modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos que auxiliem na otimização do processo exploratório de projeto associados ao uso de recursos CAD. O trabalho de Anton e Tanase (2015) teve como norte a criação de um modelo tridimensional por meio da modelagem paramétrica através de pontos demarcados pela análise energética. Qinqsong e Fukuda (2015) utilizaram os *softwares Rhinoceros®* e *Grasshopper®* para avaliação do desempenho térmico e radiação solar de um elemento criado pela modelagem paramétrica. Da Silva, et.al (2016) desenvolveram um algoritmo aplicado ao mobiliário, utilizou-se o conceito paramétrico para criação de um bicicletário. Zani e Andarolo (2017) aplicaram o conceito dos algoritmos evolutivos para a otimização de uma fachada de concreto. Fagundes, et.al. (2018) compararam dois modelos de cobogós, um adquirido por meio de escaneamento digital e outro, adquirido virtualmente via site da empresa fabricante, posteriormente aplicando a modelagem paramétrica para a elaboração de testes de iluminação natural de um elemento de proteção solar (brise) concebido pelos modelos digitais. Os resultados demonstraram a fidelidade formal e performativas de ambos modelos, por meio de testes paramétricos.

Quanto à fabricação por meio do corte a laser, a obra do arquiteto espanhol Enric Miralles é importante para a compreensão da modelagem paramétrica aliadas à fabricação digital (COLOMBO, 2011). O escritório EMBT é precursor na utilização do corte a laser para a fabricação de luminárias e demais objetos decorativos. Para isso os arquitetos utilizaram técnicas de repetição, por meio da gramática da forma, com a finalidade de criar uma integração entre arte, luz e arquitetura. Os profissionais defendem que a Dome (Figura 25), é uma luminária inspirada nas cúpulas de Igrejas

Renascentistas e tem como objetivo não apenas a emissão de luz e sim torná-la uma escultura que eleva a personalidade do ambiente. O objeto possui cerca de 170 fragmentos de madeira que formam um quebra-cabeça, com três tamanhos: 180, 90 e 60 centímetros de diâmetro.

**Figura 25** – Luminária desenvolvida por fabricação digital.



Fonte: EMBT, 2016.

O breve apanhado geral do estado da arte auxiliou na compreensão da aplicabilidade das ferramentas generativas como a modelagem paramétrica e os algoritmos evolutivos. Da mesma forma, tal levantamento evidenciou a falta de estudos da aplicação destas ferramentas aplicadas ao corte a laser, fato que motivou o norteamento desta pesquisa.

## 2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Os sistemas generativos podem ser compreendidos como uma ferramenta de projeto que possibilita a formulação de várias alternativas para um determinado problema com a utilização de regras e variáveis em um ambiente algorítmico. Os sistemas surgiram na arquitetura no século XV através de estudos matemáticos,

principalmente relacionados com a simetria. Posteriormente, temas relacionados a biologia, inspiraram os projetistas a resolver problemas por meio de ideias como a evolução natural de Darwin, genética de Mendel. Após, a computação ganhou força com os algoritmos genéticos, programação evolutiva e estratégias evolutivas com o advento do uso do computador pessoal e dos sistemas CAD-CAM-CAE, combinaram-se os conceitos matemáticos e biológicos para a formulação de ferramentas digitais que possibilitam a modelagem de um desenho algorítmico guiado por parâmetros e variáveis. Com isso, surgiram diversos estudos e classificações dos sistemas generativos, tanto para suas aplicabilidades, inserções ou substituições diante ao processo tradicional de projeto. A utilização destas técnicas também contribuiu para o avanço de uma reprodução mais automatizada e interligada à fabricação digital, principalmente por meio do uso do desenho paramétrico. A compreensão da fundamentação teórica auxiliou na representação da relação das nomenclaturas utilizadas nos conceitos dos sistemas generativos, tanto na modelagem paramétrica, quanto na utilização dos algoritmos evolutivos, em aplicações conjuntas às ferramentas digitais.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos utilizados para a realização deste trabalho, como o delineamento da pesquisa e o seu detalhamento (Figura 26). O objetivo deste estudo é de natureza exploratória, com a intenção de identificar os problemas e construir as hipóteses relacionados aos métodos dos sistemas generativos assistido por ferramentas digitais, a fim de otimizar o processo exploratório de projeto de produto em design, desde etapas de fabricação à concepção do produto.

Figura 26 – Etapas metodológicas.



Fonte: acervo do Autor.

Quanto ao procedimento técnico, a pesquisa caracteriza-se por ser bibliográfica, concebida a partir de materiais já publicados sobre o tema em questão, e experimental, onde aplica-se o controle de variáveis a um objeto de estudo, sendo ele, experimentos submetidos a simulações as materializações. A forma de abordagem do estudo é quantitativa, a fim de traduzir em números os conhecimentos e resultados adquiridos nos experimentos e qualitativa onde verifica-se a relação entre

as variáveis por meio da manipulação de condições e observação dos efeitos produzidos. Para atingir o objetivo proposto destaca-se no item a seguir o delineamento da pesquisa, que possibilita um planejamento macro para o estudo.

### 3.1 CONCEPÇÃO FORMAL

A primeira etapa da pesquisa consistiu na concepção de um modelo virtual parametrizado de uma luminária para a realização dos experimentos. Logo após, foi concebido o algoritmo evolutivo visando o teste das ferramentas para a otimização do processo exploratório. A segunda etapa deu-se pela criação de um conjunto de possibilidades por meio da simulação por exploração aleatória. Posteriormente foram utilizadas ferramentas para a otimização destas alternativas geradas. Na terceira etapa materializaram-se alguns dos resultados por meio da fabricação por corte a laser, com a finalidade de validar o algoritmo e demonstrar a aplicação das ferramentas em todo o processo da produção de um produto. Por fim, na quarta e última etapa, com os dados coletados realizou-se a análise das ferramentas generativas diante de processos tradicionais de projeto, visando sua inserção e adaptação nestes modelos.

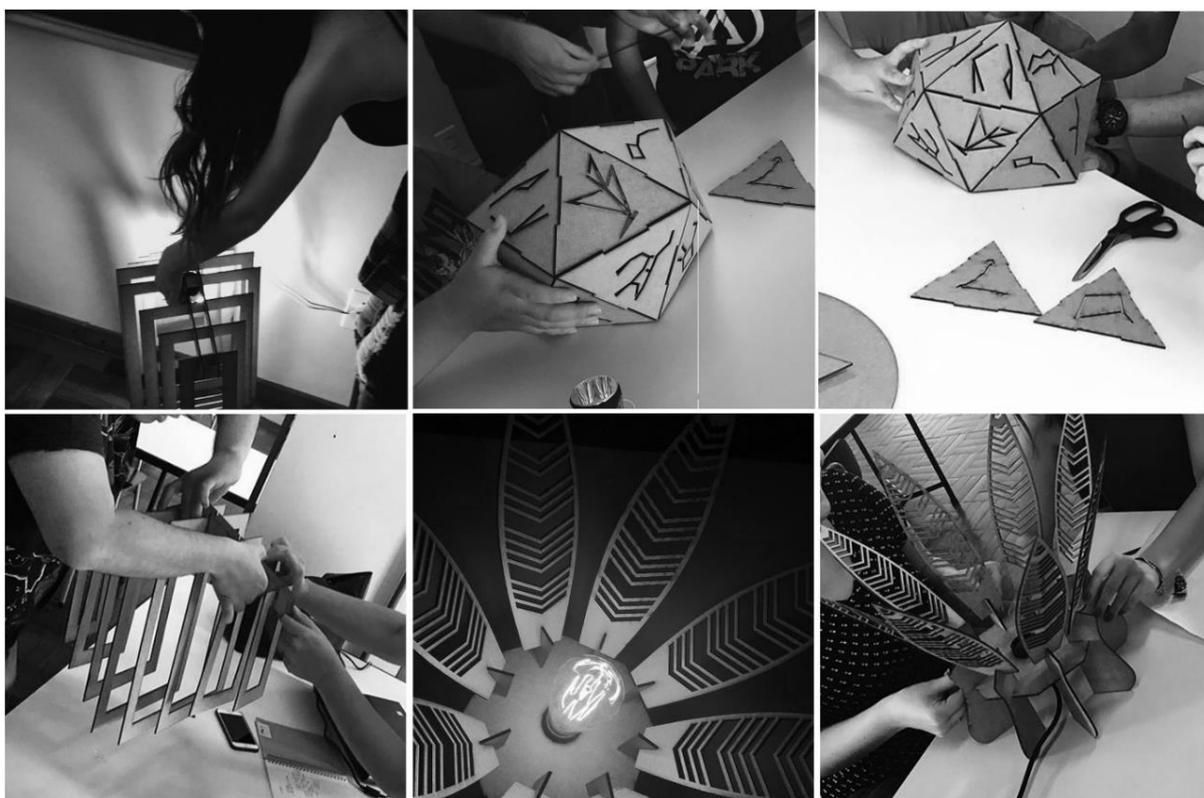
#### 3.1.1 Determinação da tipologia do objeto

A escolha da luminária como tipologia para a concepção das simulações deu-se pelo resultado de experiências do autor e que serviram como aporte e inspiração para a definição do modelo de estudo. Dentre eles, destacam-se dois casos que evidenciaram a viabilidade da produção do objeto, desde a modelagem paramétrica até a materialização.

A primeira experiência transcorreu na disciplina de Fabricação Digital, lecionada pelo autor e pela Professora Dr.<sup>a</sup> Clarissa de Oliveira Pereira no curso de graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Franciscana em Santa Maria, que foi realizada no primeiro semestre de 2018. A disciplina abordou tópicos como: princípios fundamentais da fabricação digital e suas aplicações na arquitetura; desenvolvimento de noções do uso de ferramentas relacionadas a fabricação digital; e fundamentos teóricos e práticos da modelagem paramétrica. No total, a disciplina contou com a participação de nove alunos. O método para a criação das luminárias

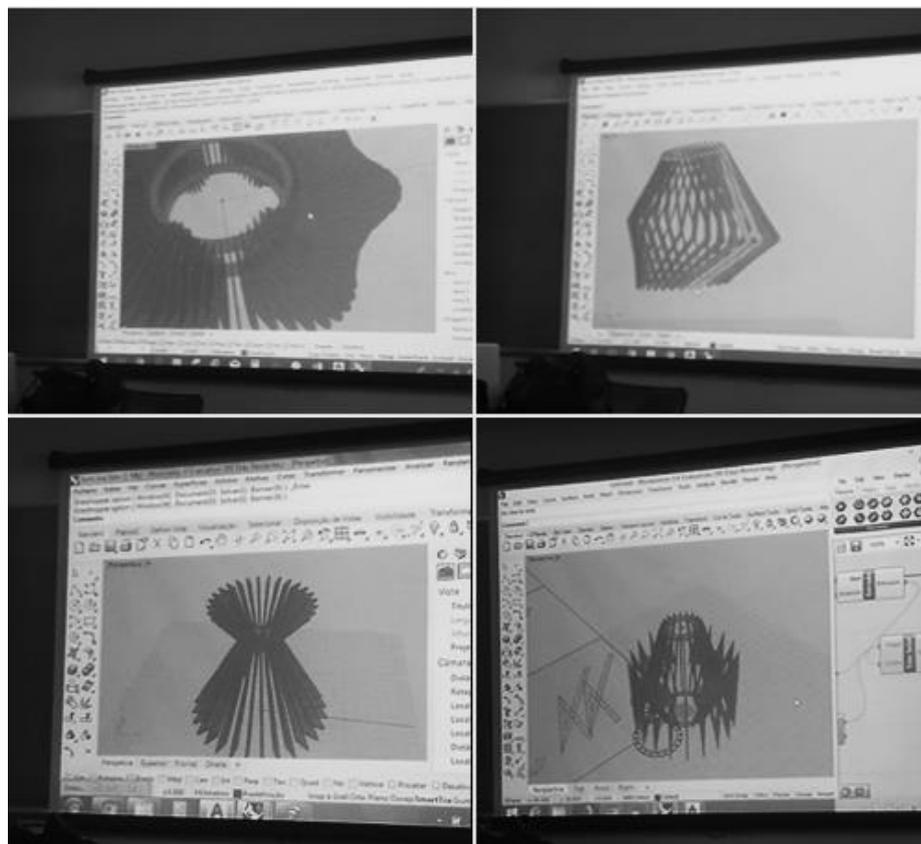
(Figura 27) foi através da modelagem paramétrica por meio do uso das ferramentas *Rhinceros*®, *Grasshopper*® e *AutoCAD* e a materialização por meio da fabricação digital através do corte a *laser*.

**Figura 27** – Protótipos das luminárias.



Fonte: acervo do Autor.

A segunda experiência deu-se na disciplina de pós-graduação em Espaços Comerciais na Universidade Franciscana, também lecionada pelo autor e pela Professora Dr.<sup>a</sup> Clarissa de Oliveira Pereira, realizada no primeiro semestre de 2018. Bem como a experiência anterior, o tema em questão foi a concepção de luminárias (Figura 28) para um ambiente comercial, desde a sua formulação por meio da modelagem paramétrica até a materialização do produto através do corte a *laser*.

**Figura 28** – Resultado dos modelos virtuais.

Fonte: acervo do Autor.

Neste contexto, ambas experiências auxiliaram na investigação e aprofundamento dos métodos da modelagem paramétrica e do corte a *laser*, realçando a aplicabilidade destas ferramentas na etapa de projeto e contribuindo para a escolha da tipologia dos estudos pilotos.

Dessa forma, e com base experiências destacadas foram demarcadas as variáveis e parâmetros para a concepção do modelo virtual em estudo. Para isso, a escolha dos parâmetros de dimensão para o estudo piloto deu-se por meio de um breve levantamento de um grupo de cinco luminárias (Quadro 4). Com a finalidade de obter informações das medidas de diâmetro, altura total e processo de fabricação de cada produto.

Quadro 4 – Levantamento de luminárias, dimensões e fabricação.

Projetista/Fabricante	Dimensões (cm)	Fabricação	Imagem
Emmanuel Osorno	<b>Altura:</b> 25,40 <b>Diâmetro:</b> 30,48	Impressão 3D	
Matsys	<b>Altura:</b> 50,80 <b>Diâmetro:</b> 50,80	Corte a <i>laser</i>	
Art Maison	<b>Altura:</b> 30,0 <b>Diâmetro:</b> 28,0	Corte a <i>laser</i>	
Boraboda	<b>Altura:</b> 40,0 <b>Diâmetro:</b> 30,0	Corte a <i>laser</i>	
Boraboda	<b>Altura:</b> 41,0 <b>Diâmetro:</b> 37,0	Corte a <i>laser</i>	
O autor	<b>Altura:</b> 40,0 <b>Diâmetro:</b> 60,0	Corte a <i>laser</i>	

Fonte: acervo do Autor.

Com isso, obteve-se informações numéricas de um intervalo entre 300 a 500 milímetros de diâmetro e 250 a 500 milímetros de altura. Estas informações foram importantes para o início da concepção formal do modelo parametrizado, ou seja, seus limites e critérios.

### 3.1.2 Modelagem paramétrica

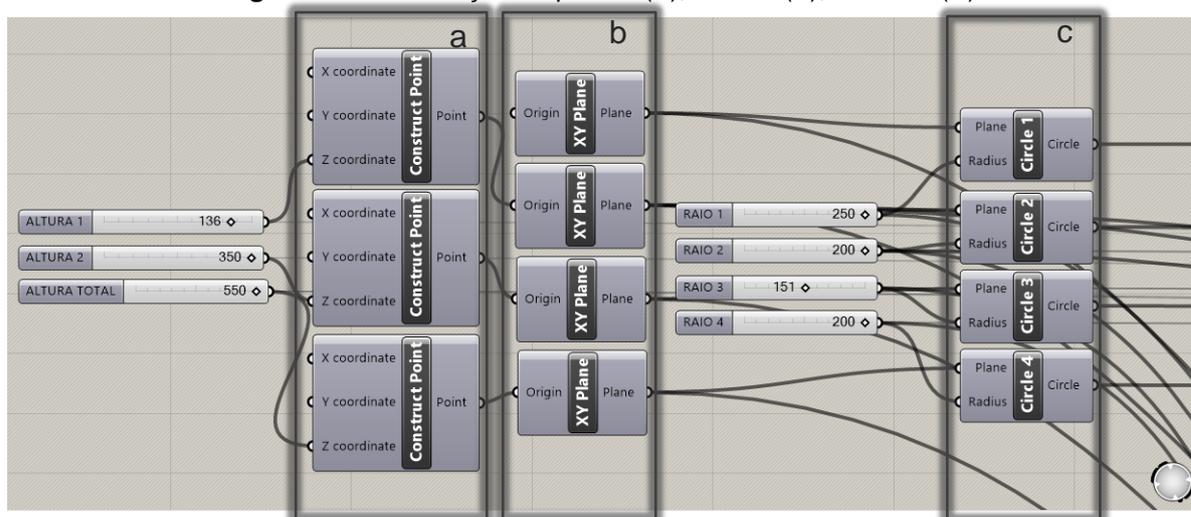
Neste item são descritos os procedimentos que originaram a criação do modelo parametrizado. Inicialmente, a escolha dos *softwares* para a parametrização do modelo virtual surgiu por meio da necessidade da utilização de programas computacionais de fácil manipulação de programação visual (MARTINO, 2015). Para isso, adotou-se a ferramenta *Grasshopper®*, desenvolvida como um *plug-in* do *software* de modelagem CAD, o *Rhinoceros®*.

O início da concepção formal da peça deu-se através da criação de quatro círculos com diferentes alturas e raios (Figura 29A), a fim de criar uma variação formal. Para isso, utilizou-se o componente *circle* (Figura 29C), para a concepção da geometria básica. O componente dispõe de dois *inputs*: *plane* e *radius* (Figura 29B), sendo o primeiro para demarcar um plano de origem no espaço cartesiano e o segundo para definir o raio da geometria.

O primeiro passo foi a demarcação da altura de cada círculo, para gerar a variação formal. Com isso, criou-se quatro componentes *number sliders*, todos ligados ao *input plane* de cada *circle*. No primeiro *number slider* utilizou-se o número zero para demarcar a origem do modelo, o segundo foi de 100 a 200 milímetros, o terceiro de 300 a 400 milímetros e o quarto 450 a 550 milímetros (definindo a altura máxima do produto).

Após, com a finalidade de gerar a variação formal, foram pré-estabelecidos os primeiros valores dos raios do objeto, por meio da utilização do componente *number slider* ligado ao *input radius* de cada *circle*. O primeiro intervalo de raio foi de 30 a 100 milímetros, o segundo e o terceiro de 40 a 100 milímetros e o último de 30 a 32 milímetros devido ao tamanho do soquete para a colocação da lâmpada.

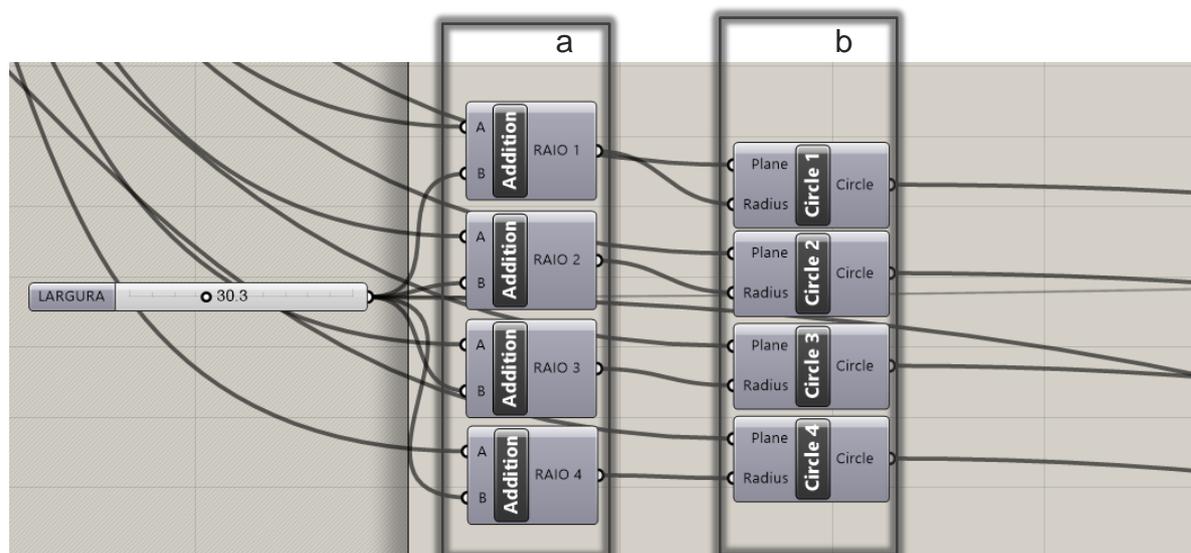
**Figura 29** – Construção de pontos (A); Planos (B); Círculos (C).



Fonte: acervo do Autor.

No segundo passo (Figura 30B), realizou-se a delimitação da largura das peças. Com isso, criaram-se quatro círculos, na mesma posição dos demais, porém, com raio diferentes, com a finalidade de criar uma superfície para a largura de cada peça. Para isso, gerou-se uma expressão matemática de adição por meio do componente *addition* (Figura 30A), que dispõe da função de acrescentar um determinado valor a outro componente, a fim de gerar um resultado. Desse modo, acresceu-se um intervalo entre 20 e 30 milímetros para cada *input* de raio dos novos componentes *circle*, criando o parâmetro de largura de cada peça.

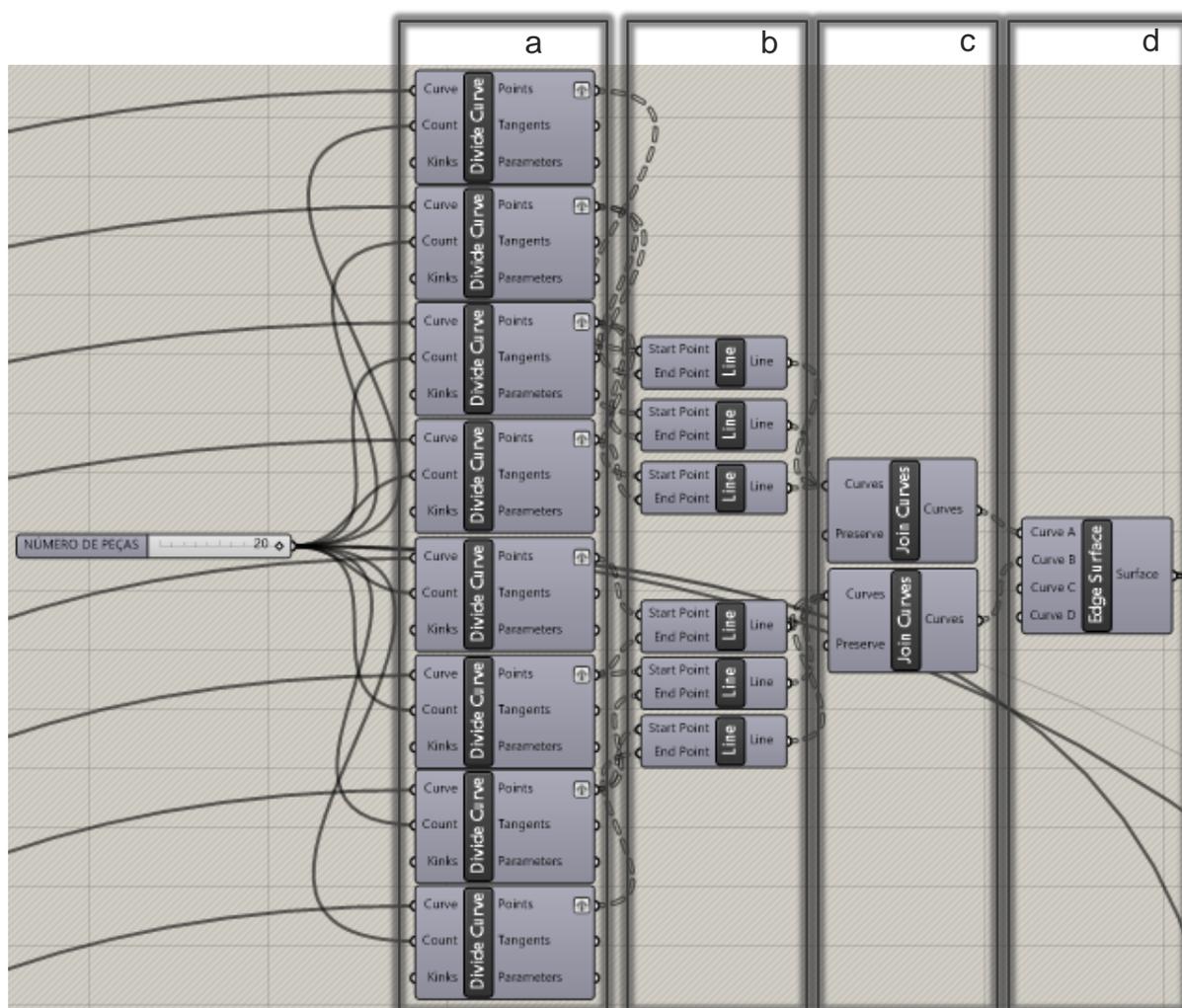
**Figura 30** – Adição (A); Criação dos círculos (B).



Fonte: acervo do Autor.

O terceiro passo correspondeu a divisão dos círculos com o objetivo de criar o parâmetro da quantidade de número de peças. Para isso, todos os círculos foram divididos com a utilização do componente *divide curve* (Figura 31A), com um intervalo de variação entre 10 e 20 peças, criado pelo *number slider* e conectado no *input count* do componente *divide curve* (Figura 31B). Dessa maneira, gerou-se um conjunto de 10 a 20 pontos em cada círculo, para servir como base para a criação das peças verticais (Figura 31C). Com o conjunto formado, criou-se uma superfície para cada par de linhas, por meio do componente *edge surface* (Figura 31D). Desse modo, completou-se o parâmetro de largura.

**Figura 31** – Divisão (A); Criação de linhas (B); Junção (C); Superfícies (D).

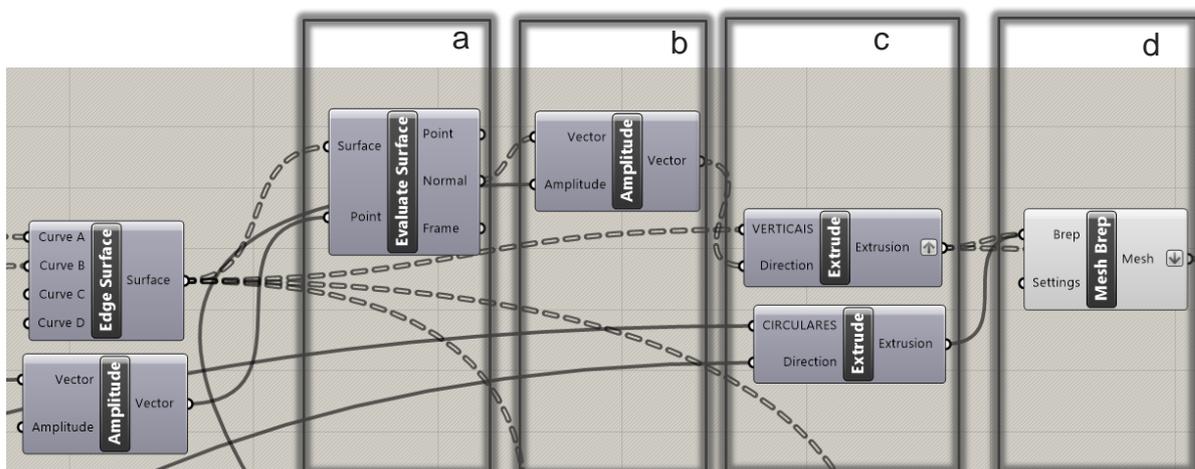


Fonte: acervo do Autor.

O quarto passo (Figura 30), foi a extrusão das superfícies oriundas da união dos círculos e da união das linhas com o propósito de obter o parâmetro de espessura

da chapa. Para a extrusão das superfícies circulares, utilizou-se o componente *extrude* (Figura 32A), o componente *unit z* para direcionar o eixo do direcionamento da extrusão e o componente *number slider* com valores de 3, 6 e 9 milímetros para demarcar o parâmetro de cada espessura de chapa. Já para a extrusão das superfícies verticais, o fator limitador foi o fator de cada direção distinta da extrusão. Para solucionar o problema, utilizou-se a componente *is planar* (que possui a função de localizar e demarcar o plano de cada superfície), desse modo, com a utilização do componente *amplitude* (Figura 32B) extrudaram-se a partir dos mesmos valores das superfícies circulares todas as superfícies com a direção perpendicular ao seu respectivo plano (Figura 33C).

**Figura 32** – Normais (A); Direção (B); Extrusão (C); Criação da malha (D).



(Fonte: acervo do Autor)

Por fim, o último passo, que antecedeu os parâmetros do algoritmo evolutivo, foi a conversão de *brep* para *mesh* (Figura 32D), esta etapa foi necessária para possibilitar a simulação dos componentes referentes ao algoritmo evolutivo, que serão explicados no item a seguir.

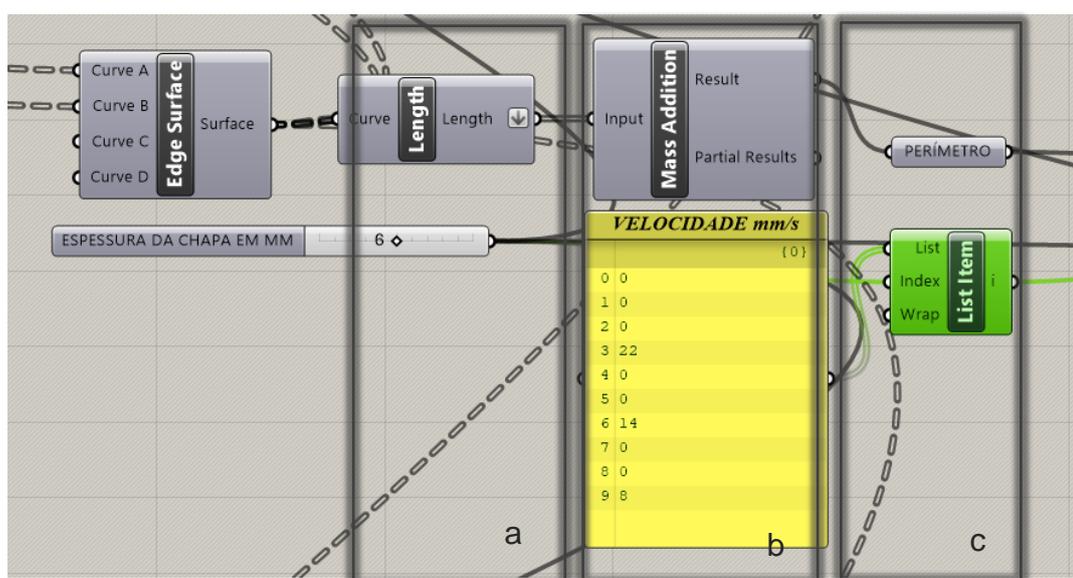
### 3.1.3 Algoritmo evolutivo

A criação do algoritmo evolutivo deu-se pela concepção de três parâmetros bases, sendo eles: tempo para o corte a laser; custo total do corte; e planificação para a fabricação do produto. Para a realização do teste da aplicação esta pesquisa apoiou-se em diversos trabalhos, dentre eles, os estudos de Harding e Olsen (2018):

desenvolvedores do *plug-in Biomorhper*, e estudos de Martino (2015) por meio do uso da ferramenta Galápagos.

Na primeira etapa, referente a concepção do algoritmo evolutivo, a ideia foi relacionar a velocidade da máquina de corte a laser com o perímetro total das peças. Para isso, criaram-se dois componentes para a medição do perímetro total. Tomou-se o componente *length* (Figura 33A) e o componente *mass addition* (Figura 33B), sendo o primeiro foi conectado à *edge surface*, para obter o valor do perímetro de cada peça. Para a soma do valor total de todas as peças, utilizou-se o segundo componente, com isso, obteve-se o somatório final do perímetro de todo o modelo. Quanto ao valor da velocidade da máquina, criou-se um *panel* com os valores referentes à espessura da chapa e a velocidade e em que a máquina corta cada uma delas. Os valores da velocidade da máquina (Figura 33C) foram obtidos por meio de informações do Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LIFEELAB). O laboratório possui um conjunto de valores já testados para cada tipo de material e respectiva espessura. Nesta pesquisa utilizou-se os materiais mais utilizados na fabricação de modelos semelhantes. Foram utilizados valores de 22 mm/s para a chapa de MDF de 3 milímetros de espessura, 14 mm/s para a chapa de MDF de 6 milímetros de espessura.

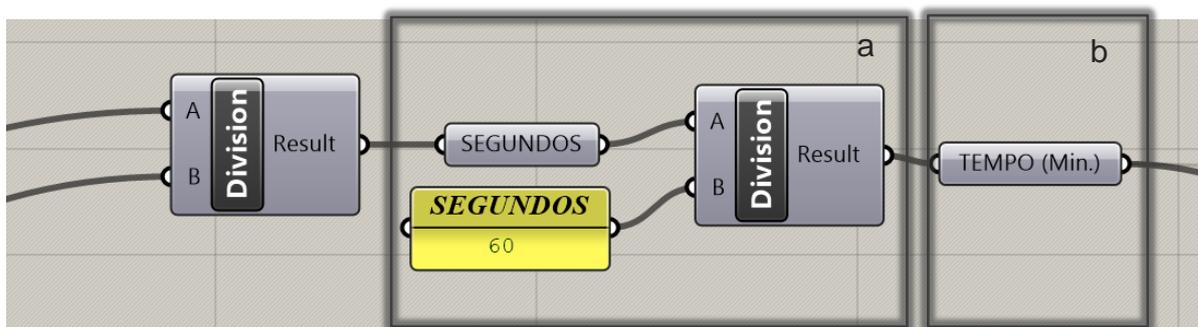
**Figura 33** – Perímetro total (A); Velocidades (B); Resultado (C).



Fonte: acervo do Autor.

Com isso, gerou-se uma relação entre a velocidade e o perímetro total, por meio da utilização do componente *division* (Figura 34A), para dividir o valor do perímetro (em milímetros) com o valor da velocidade (em milímetros por segundo). Com isso, obteve-se um valor em segundos, e após foi convertido em minutos, também pelo componente *division* com um fator de divisor de 60 segundos (Figura 34).

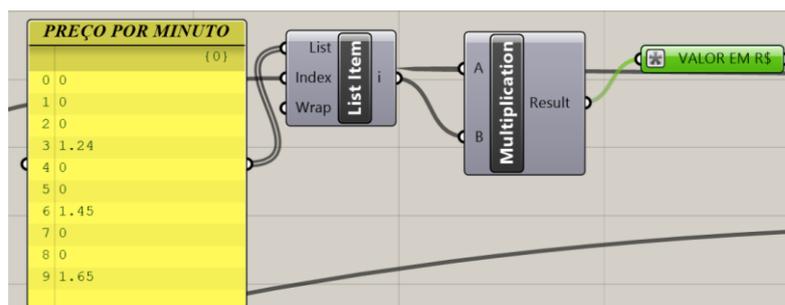
**Figura 34** – Componentes referentes ao tempo de fabricação.



Fonte: acervo do Autor.

Após a coleta de dados do valor do tempo em minutos, o mesmo serviu como base para a atingir o valor do custo total do corte a laser. Para isso obteve-se o valor do custo por minuto do corte de cada material por meio de uma tabela de valores, também obtida através de informações oriundas do LIFEELAB. O custo total foi relacionado com o tempo, tipo e área de material utilizado. Os valores utilizados foram fictícios, apenas como teste. Para obtenção deste valor total, criou-se um *panel* (Figura 35) com os respectivos valores para cada espessura e material referente ao valor por minuto de cada material e espessura, logo após foram multiplicados estes valores com o valor do tempo total, adquirido anteriormente. Com isso, gerou-se o custo total do modelo.

**Figura 35** – Painel com informações do custo de fabricação.



Fonte: acervo do Autor.

Após a criação do algoritmo foram testadas a aplicação das ferramentas generativas para a otimização do processo exploratório. Diante disso, a seguir serão destacados os procedimentos adotados para a realização dos experimentos.

## 3.2 SIMULAÇÃO VIRTUAL

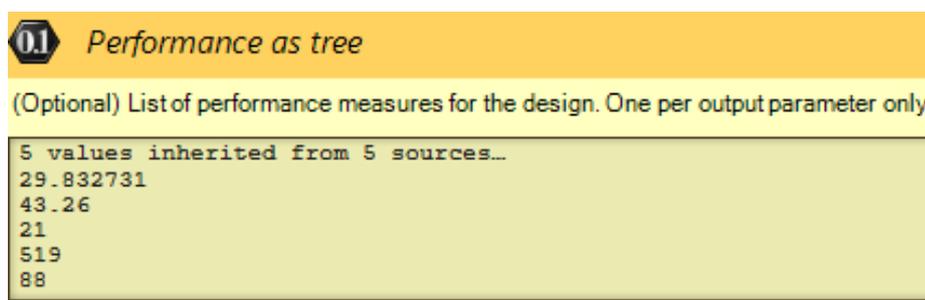
O método para a realização dos experimentos dividiu-se em quatro etapas, sendo elas: a exploração das alternativas geradas pelo algoritmo evolutivo; a otimização dos resultados obtidos, planificação do modelo virtual; e a materialização do produto.

### 3.2.1 Exploração

O primeiro processo do resultado exploratório foi concebido de forma aleatória, ou seja, todas as alternativas geradas (modelos virtuais) possuíam características distintas. Para a realização desta etapa utilizou-se a ferramenta Galápagos. Dessa maneira, para a criação deste conjunto foram conectados um total de 12 valores à população inicial do *Genome*, este grupo numérico representa cada *number sliders* concebido na etapa da modelagem paramétrica. Ou seja, os valores das alturas, das circunferências e o número de peças dos modelos (Figura 36).

Na aba *performance* foram dispostos todos os valores listados como critérios importantes para o funcionamento do algoritmo evolutivo. Estes valores representam o intervalo numérico correspondente ao valor total do objeto, tempo de corte a laser, quantidade de peças, largura e altura dos modelos.

**Figura 36** – Informações para a alimentação da ferramenta *Biomorpher*.



Fonte: acervo do Autor.

Neste caso, os critérios utilizados para exploração da primeira geração de alternativas foram: tamanho da população de 200 soluções, taxa de crossover de 0.10 e taxa de mutação de 0.01. Com isso, geraram-se randomicamente as alternativas. Neste contexto, para a execução do teste exploratório, não houve nenhum critério prévio da população pré-estabelecido, a intenção em primeiro momento deu-se pela possível criação de um conjunto de alternativas não pensadas ou previstas pelo projetista. Para isso, gerou-se a otimização deste conjunto de possibilidades, visando o teste e eficiência das ferramentas generativas diante deste contexto.

### 3.2.2 Otimização

Como destacado anteriormente, para o processo de otimização testaram-se duas ferramentas generativas. No primeiro momento utilizou-se a ferramenta Biomorpher e posteriormente a ferramenta Galápagos. A utilização da primeira ferramenta deu-se pelo resultado do conjunto do processo exploratório do item anterior, com isso foram utilizados os próprios resultados da etapa descrita anteriormente. Para tal, utilizou-se o mecanismo *Desing Properties* da ferramenta Biomorpher.

No primeiro momento, foram definidos os critérios alvos a serem alcançados. Como o norte desta pesquisa não é a formulação do produto e sim o estudo do processo, os critérios para a formulação do artefato foram arbitrados de forma aleatória, apenas como uma demarcação inicial para os experimentos (BONSIEPE, 1984). Diante disso, demarcaram-se os seguintes critérios alvos para a primeira simulação de otimização, conforme o Quadro 5:

**Quadro 5** – Critérios principais baseados no modelo de Bonsiepe.

<b>CRITÉRIOS PRINCIPAIS</b>	<b>ALVO</b>
<b>Forma</b>	Forma de Tulipa
<b>Custo Total</b>	R\$ 35,00
<b>Tempo de fabricação</b>	30 minutos

Fonte: acervo do Autor.

O método dos critérios da simulação foi baseado nos processos tradicionais de projeto do design de produto. Uma vez que, foi adotada a técnica analítica de Gui Bonsiepe (Quadro 6) para a demarcação da ordem de prioridades.

**Quadro 6** – Critérios auxiliares principais baseados no modelo de Bonsiepe.

<b>CRITÉRIOS AUXILIARES</b>	<b>ALVO</b>
Peças	25 peças.
Altura	420mm.
Largura	124mm.

Fonte: acervo do Autor.

Dessa maneira, foi possível realizar de forma orientada ambas etapas da simulação virtual. Após, realizou-se os procedimentos para a fabricação digital do produto, que serão destacados no item a seguir.

### 3.3 MATERIALIZAÇÃO

Para a realização desta etapa foram realizados dois procedimentos: a etapa de planificação, que serviu como aporte para a fabricação do modelo físico e a fabricação por corte a laser propriamente dita.

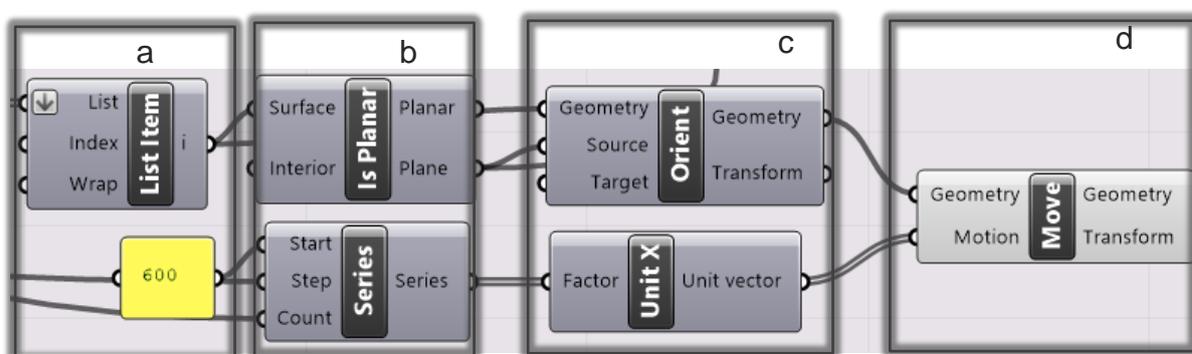
#### 3.3.1 Planificação

Após a escolha do modelo a ser fabricado, foi utilizado o método de planificação para o corte a laser. Pupo (2009) retrata que as cortadoras a laser possuem a finalidade de produzir objetos 2D (em extensões DXF, como AutoCAD, *Rhinoceros*®, Corel Draw) para a então obtenção de um modelo 3D por meio de montagem manual. Para isso, é necessário a criação de componentes que possibilitem a planificação do modelo para o corte a *laser*. Para esse fim, criou-se uma etapa do algoritmo com a função de orientar todas as peças para o plano XY do *Rhinoceros*®.

Ao todo foram necessários sete componentes para a elaboração do estudo. Como o objeto possui uma estrutura radial perfeita, todas as peças consequentemente

são idênticas, facilitando também, o processo de corte. Com isso, o primeiro passo foi a seleção de apenas uma peça (Figura 37A), esta posteriormente foi orientada (Figura 37B) ao plano XY por meio do componente *orient* (Figura 37C) e após replicada lado a lado no eixo X, por meio do componente *move* (Figura 37D). Para a cópia das peças, utilizou-se o componente *series*, que possui a função de criar um conjunto de cópia a partir de três parâmetros: *start*, sendo a localização da origem do conjunto; *step*, para demarcar o distanciamento entre as peças; e *count*, para definir a quantidade de peças.

**Figura 37** – Seleção (A); Seleção da face (B); Orientação (C); Movimentação (D).



Fonte: acervo do Autor.

Os valores utilizados foram de 600 para o *start*, o valor da largura inicial anteriormente definida no início para o *step* (com isso cada peça fica exatamente lado a lado) e o número total de peças também já demarcados anteriormente para o *count*.

### 3.3.2 Corte a laser

Para realização do corte a laser foi utilizado a cortadora a laser 1000x600 - MC 1060 do Laboratório de Inovação e Fabricação Digital (LIFEELAB). No total foram realizados 5 testes de fabricação. Os parâmetros utilizados na máquina foram os mesmos adotados no algoritmo, de 22 mm/s para a chapa de 3mm. Para isso, utilizou-se o software de manipulação da máquina (LaserCut 5.3), sendo possível prever o tempo de realização do corte (fator determinante para o critério de otimização descrito anteriormente). Para este teste, também foi utilizado o software RDWorksV8, com os mesmos parâmetros e valores para a verificação do algoritmo.

### 3.4 INSERÇÃO AO MODELOS TRADICIONAIS

O último procedimento foi a análise comparativa, para isso, utilizaram-se os resultados oriundos das simulações virtuais, bem como as revisões bibliográficas acerca dos processos tradicionais de projeção e os sistemas generativos. Para isso, as temáticas foram organizadas conforme as etapas descritas em cada modelo e preenchidas com os conceitos das ferramentas generativas, como o desenho paramétrico e os algoritmos evolutivos.

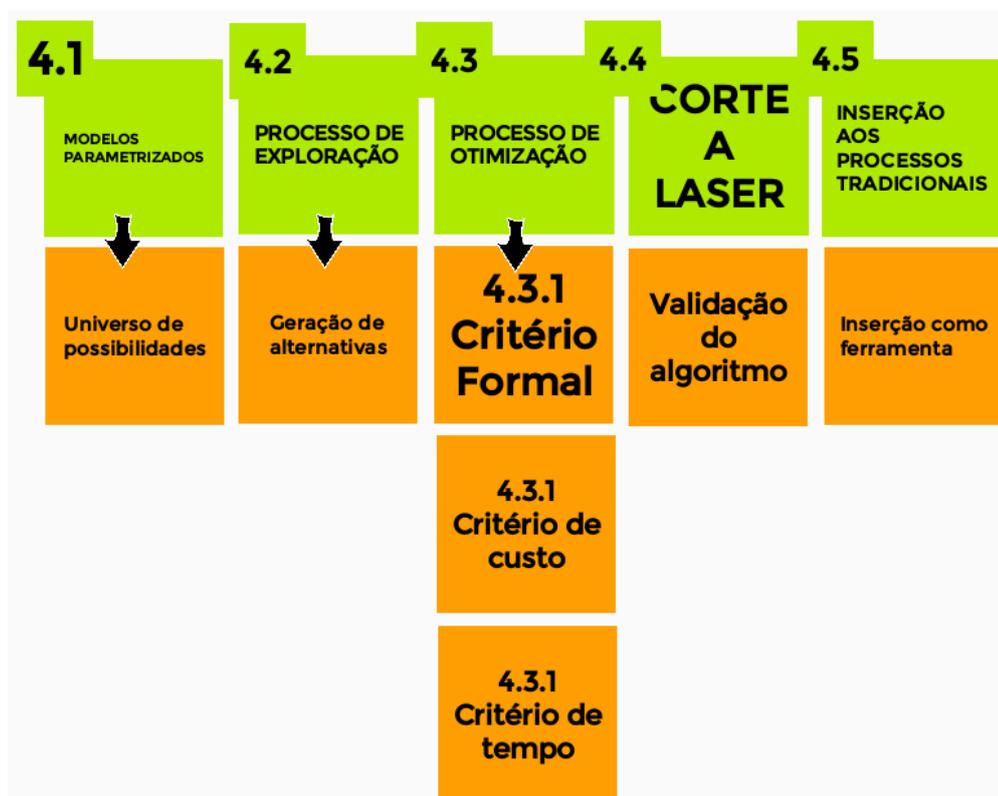
### 3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

O processo metodológico possibilitou criar estratégias, que auxiliaram no entendimento da eficácia da união dos sistemas generativos para a modelagem e otimização de um produto orientado ao corte a laser. A modelagem paramétrica possibilitou por meio da ferramenta *Rhinoceros*® em conjunto ao plug-in *Grasshopper*® a concepção geométrica do elemento. Dessa forma, foi possível orientar a inserção de todos os critérios desejados, através da utilização de componentes que armazenam a informação das variáveis. A ferramenta paramétrica possibilitou também, a troca rápida de informação, aumentando a velocidade na escolha de alternativas, bem como, a total integração de componentes. De certa forma, tal sistema resultou um amplo campo de soluções, o que tornou necessária a aplicação do algoritmo evolutivo para auxiliar na escolha dos resultados mais satisfatórios. Diante disso, utilizaram-se as ferramentas Galápagos e *Biomorpher*, ambas com mecanismos evolutivos de busca de soluções. A primeira possibilitou a criação de um ranqueamento das melhores soluções desejadas, por meio dos critérios pré-estabelecidos. Já a segunda, auxiliou na exploração e otimização dos elementos, por meio de uma escolha randômica e uma separação automática em doze distintos grupos. Sendo que cada grupo, agregou os elementos que possuíam maiores semelhanças. Posteriormente, a ferramenta possibilitou a otimização dos resultados diante dos critérios previamente estabelecidos, por meio do cruzamento e recombinação dos grupos. Dando origem ao produto. Por fim, tais resultados serviram como aporte para a análise da inserção das ferramentas generativas aos modelos tradicionais do design de produto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das etapas apresentadas na metodologia: modelos parametrizados; possibilidades; processo de exploração, processo de otimização, corte a laser; e a inserção das ferramentas generativas em processo tradicionais de projeto (Figura 38).

Figura 38 – Estrutura dos resultados.



Fonte: acervo do Autor.

### 4.1 MODELOS PARAMETRIZADOS

Nesta etapa são expostos os resultados do modelo virtual parametrizado. Bem como a quantidade de possibilidades do modelo. O resultado da primeira etapa da formulação do modelo parametrizado (Figura 39) demonstrou a amostragem das possibilidades de variações proporcionadas pelo algoritmo. Nesta etapa, criaram-se as primeiras variáveis da criação dos limites do objeto através da concepção dos círculos. Com isso, destaca-se também nesta etapa a quantidade de variações do modelo oriundos da multiplicação das diferentes alturas conjuntamente com o intervalo de variação derivada dos raios das circunferências.

**Figura 39** – Variações proporcionadas pelo diâmetro das circunferências internas.



Fonte: acervo do Autor.

O resultado da quantidade de variações deu-se pelo produto da multiplicação do intervalo numérico das alturas (conjunto discreto de 1cm, ou seja, início do conjunto em 50cm até 200cm) de 150 e o resultado da multiplicação do intervalo da variação dos raios (intervalos de R1: 200cm; R2:120cm; R3: 220cm; R: 270cm) total de  $1,4256e^9$ . Com isso, obteve-se o resultado  $2,1384e^{11}$  (produto dos fatores 150 e  $1,4256e^9$ ) do primeiro conjunto de variações.

Neste contexto, com algumas adições de parâmetros e componentes, aumentaram-se cada vez mais as possibilidades do produto. Conforme a Figura 40, que refere-se segunda etapa de modelagem referente a criação da largura da peças verticais, acrescentou-se um fator de multiplicação de 30. Diante disso, a conjunto total de possibilidades cresceu de  $2,1384e^{11}$  para  $6,45152e^{12}$  de variações.

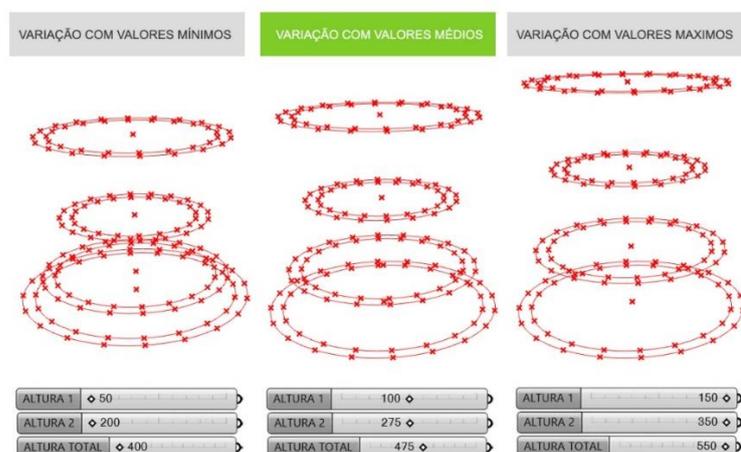
**Figura 40** – Variações proporcionadas pelo diâmetro das circunferências externas.



Fonte: acervo do Autor.

A próxima etapa, destacada na Figura 41, referente a criação do número de pontos para a concepção das peças horizontais, deu-se por meio da união de pontos e linhas, para posterior criação da superfícies. Diante disso, originou-se o parâmetro com um fator de multiplicação de 50 para o total de possibilidades. Com isso, o conjunto total de alternativas novamente foi acrescido de  $6,45152e^{12}$  para  $3,0294e^{18}$  possibilidades. Neste contexto, destaca-se que a cada criação de um conjunto de variáveis (*number sliders*) o processo torna-se cada vez maior, conseqüentemente, aumentando a população final das possibilidades. Contudo, podem existir parâmetros estáveis, ou fixos, que são criados por meio do componente *panel*.

**Figura 41** – Criação de pontos.



Fonte: acervo do Autor.

As etapas posteriores são resultantes da composição formal dos componentes fixos, obtendo-se o resultado da união e junção das linhas para a elaboração das superfícies, bem como suas extrusões. Diante disso, o resultado (Figura 42) foi o esqueleto do modelo virtual. Uma vez que, o fator numérico de variação é do componente anterior (número de pontos), nesta etapa não houve variação das possibilidades, diante disso, o conjunto de alternativas tornou-se estável.

**Figura 42** – Ligações dos pontos para a concepção das linhas.



Fonte: acervo do Autor.

A figura 43, retrata a junção das linhas para a formação das superfícies propriamente ditas. Originadas pelo componente *edge surface*, tal fator foi importante para a posterior planificação das peças, na etapa de orientação ao corte a laser.

**Figura 43** – Criação das superfícies.



Fonte: acervo do Autor.

Por fim, o resultado do componente *extrude* originou a tridimensionalidade das peças horizontais. Da mesma forma, por estar ligada à quantidade de pontos, esta etapa não gerou novas alternativas. Com isso, na figura 44, retrata-se a variação formal, do conjunto mínimo, médio e máximos do número de peças.

**Figura 44** – Criação dos elementos tridimensionais.



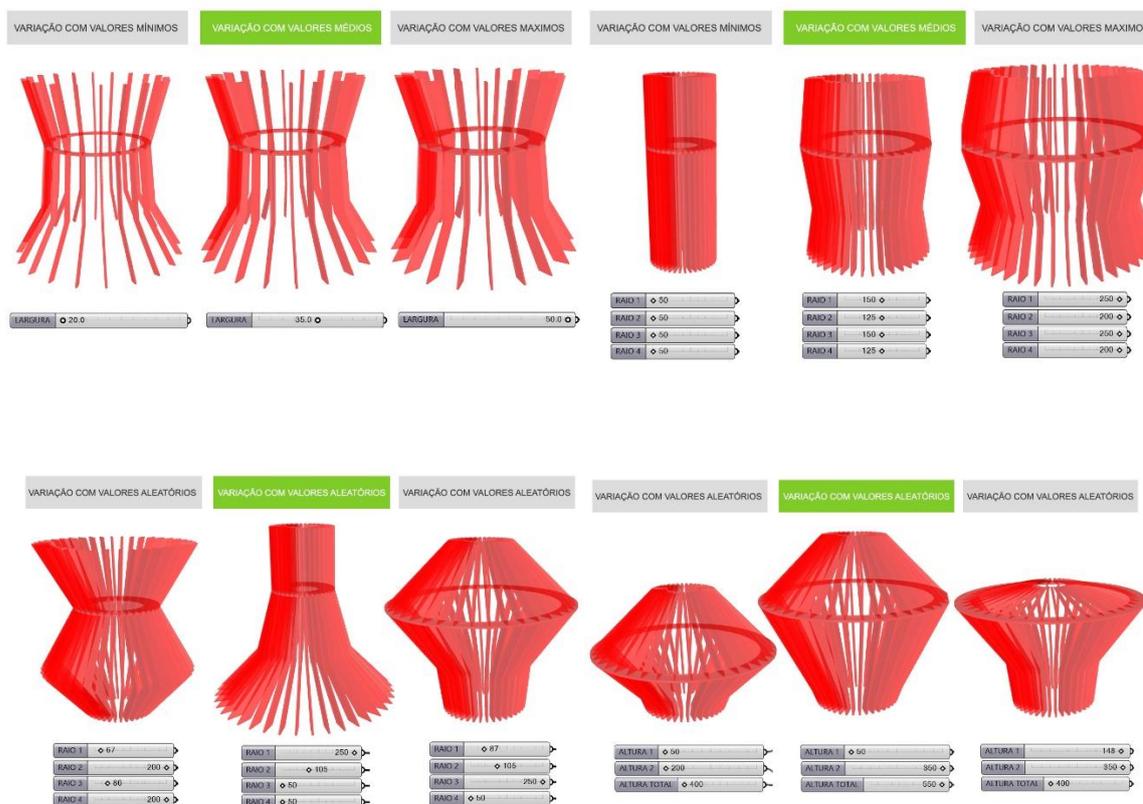
Fonte: acervo do Autor.

Em relação ao processo, a modelagem paramétrica permite a concepção formal de um modelo geométrico totalmente integrado por meio de um processo algorítmico (FLORIO, 2012). Isso fez com que, cada parâmetro gerasse um acréscimo de possibilidades em virtude de todos os componentes estarem interligados (CELANI, 2003).

Até a presente etapa, o algoritmo funcionou de forma correta. A maior dificuldade deu-se na etapa de extrusão das peças, onde obteve-se cada um dos vetores normais, para a extrusão correta da superfície.

O conjunto final da modelagem paramétrica (Figura 45) originou uma população de  $3,0294e^{18}$  de alternativas. Diante deste contexto, seria praticamente impossível selecionar as melhores alternativas manualmente. A não ser o que o produto já estivesse com todas as dimensões e critérios definidos. Contudo, diante de um complexo modelo lógico, talvez, seria mais simples apenas conceber o objeto por meio de um processo tradicional.

**Figura 45** – Conjunto de algumas possibilidades concebidos por meio do desenho paramétrico.



Fonte: acervo do Autor.

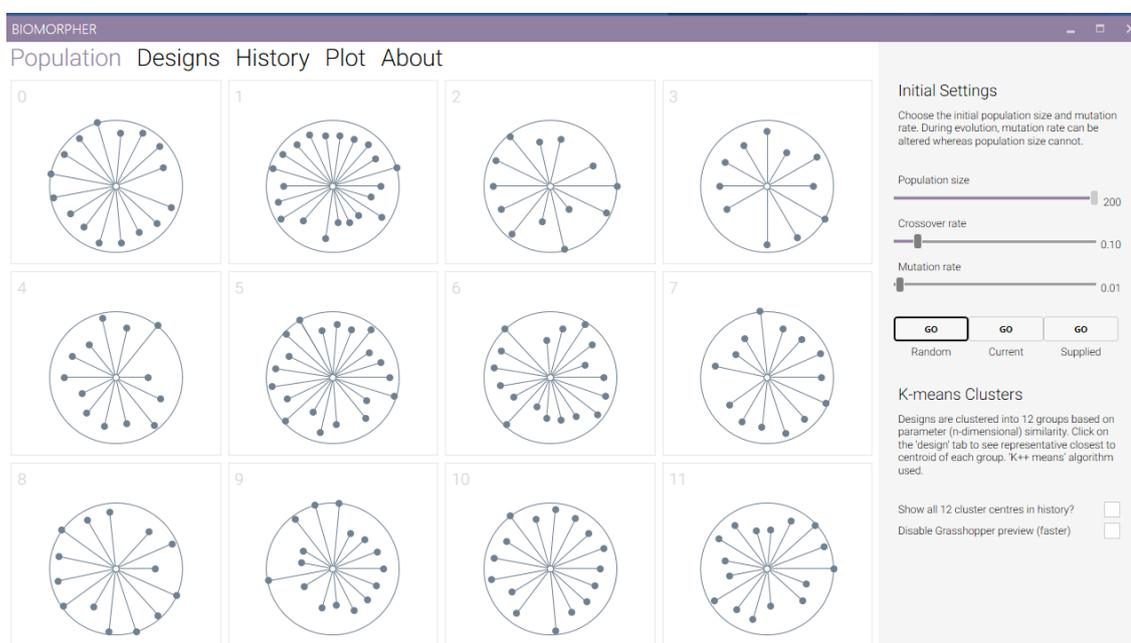
Diante da grande população de possibilidades geradas no processo, testou-se o método generativo formado pelos algoritmos evolutivos orientado ao corte a laser. Diante disso, a próxima etapa retrata o resultado dos experimentos aplicados a diferentes problemas de projeto, como a exploração e otimização, bem como o teste via corte a laser com a finalidade de avaliar a precisão do algoritmo.

## 4.2 PROCESSO DE EXPLORAÇÃO

O primeiro resultado exploratório, foi um conjunto de 200 indivíduos concebidos de forma aleatória, todos com características distintas. Os resultados são descritos em 12 grupos, organizadas pelo grau de parentesco e similaridade entre os indivíduos (Figura 46), uma vez que, quando a população é reduzida torna-se mais apropriado para uma escolha de seleção interativa e manual do projetista, visto que, em um processo exploratório, onde os critérios não estão bem definidos, uma grande

quantidade de soluções pode tornar o processo de escolha desgastante (MARTINO, 2015).

**Figura 46** – Conjunto de possibilidades, separados por grau de similaridade.

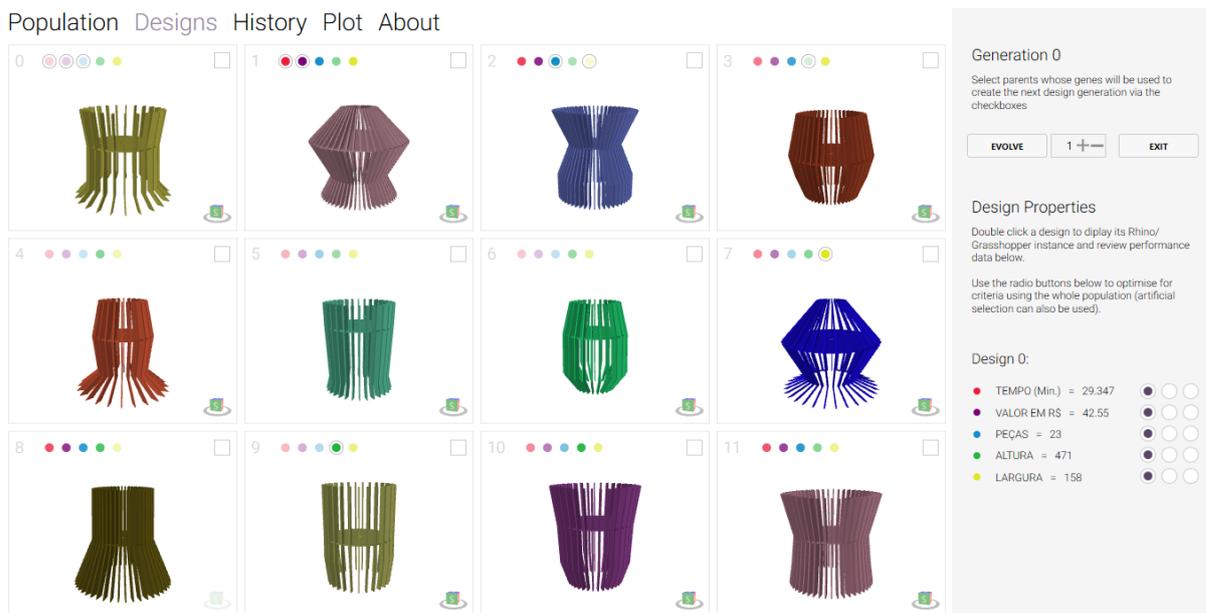


Fonte: acervo do Autor.

Diante disso, no primeiro momento, como não houve nenhuma especificação prévia para a elaboração da simulação cada objeto foi destacado por distintas cores (Figura 47), esta característica foi importante para a visualização do amplo conjunto das possibilidades (HARDING E OLSEN, 2018).

Contudo, como o problema não possuía critérios bem definidos, o uso da ferramenta de modo exploratório pôde gerar maiores dificuldades para a escolha das alternativas satisfatórias, uma vez que a população inicial está contida em um amplo universo (CELANI, VAZ E PUPO, 2013). Em outras palavras, a primeira redução do número da visualização das alternativas foi de  $3,0294e^{18}$  para 12 ou seja, uma redução praticamente inexistente no campo de possibilidades, o que transformou o processo ainda pouco eficaz.

**Figura 47** – Geração 1: Conjunto de possibilidades fornecidas pelo processo exploratório.



Fonte: acervo do Autor.

Dessa maneira, fez-se necessário a implementação do processo de otimização, sobretudo porque a utilização do processo exploratório serviu apenas para a visualização do conjunto de alternativas, bem como, as possibilidades não previstas pelo projetista (CELANI, VAZ E PUPO, 2013).

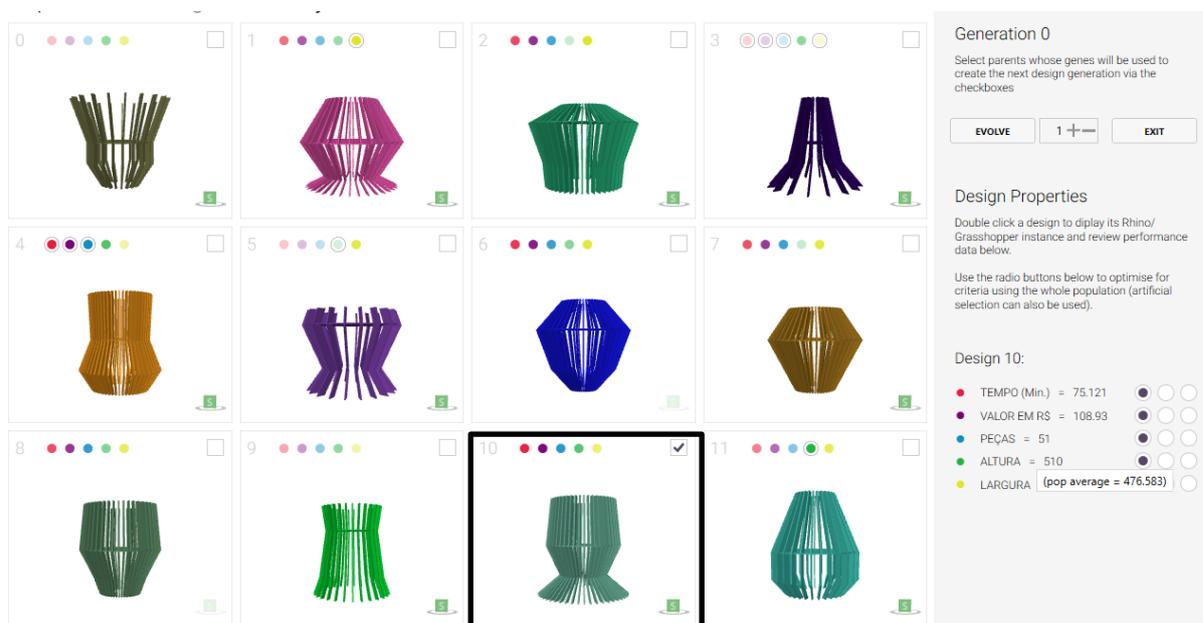
### 4.3 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Neste item destacam-se os resultados do processo de otimização das alternativas concebidas anteriormente na etapa exploratória. Os mesmos são organizados conforme a ordem dos critérios demarcados no item 3.2.2.

#### 4.3.1 Critério formal

O critério formal foi o primeiro a ser testado diante da geração da simulação de otimização. A solução mais satisfatória foi atingida após 6 simulações aleatórias (exploração sem critérios pré-definidos). Isso deu-se pelo fato de a ferramenta não possuir um mecanismo de otimização prévia. Com isso, a alternativa 10 (Figura 48) surgiu como a solução formal mais apropriada para o critério. O tempo total da simulação foi de 123 segundos, com uma geração de 200 alternativas separas em 12 grupos dispostos por grau de afinidade (parentesco).

**Figura 48** – Geração 2: Exploração aleatória inicial.



Fonte: acervo do Autor.

A ferramenta mostrou-se veloz e eficiente em um primeiro momento, porém, ao realizar maiores testes formais, a mesma tornou-se menos assertiva em virtude do amplo campo de possibilidades. Ainda que alterando por meio do desenho paramétrico os valores formais dos parâmetros iniciais, como raios e alturas possa gerar uma solução mais eficaz. Diante disso, o resultado número 10 (Figura 49) foi o mais aproximado e satisfatório, a partir deste modelo iniciaram-se os estudos com a otimização mais precisa, por meio da aba propriedades da ferramenta *Biomorpher*.

**Figura 49** – Alternativa satisfatória para o critério formal.



Fonte: acervo do Autor.

Com isso gerou-se uma família de alternativas (Figura 50) por meio da concepção de novas possibilidades oriundas das características do objeto 10. O resultado desta simulação foi um conjunto com aspectos formais semelhantes. Os critérios da aba de propriedades foram mantidos, apenas criou-se uma nova geração, com isso, delimitou-se o campo de possibilidades, o que trouxe maior eficiência para a solução.

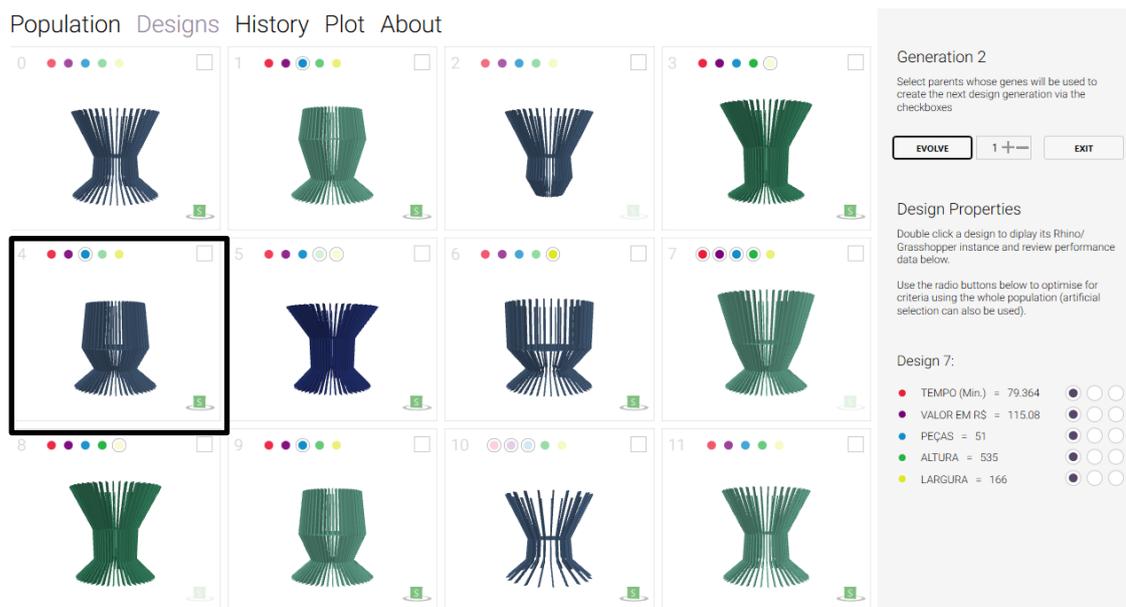
**Figura 50** – Geração 1: Conjunto de alternativas oriundos do objeto 10.



Fonte: acervo do Autor.

Ainda em relação ao critério formal (Figura 51), destaca-se que nem todas as alternativas possuem semelhanças estéticas. Diante desse fator, a ferramenta possibilita o cruzamento dos indivíduos, com isso, há possibilidade de um aumento da semelhança da nova população gerada (MARTINO, 2015; HARDING E OLSEN, 2018). Para isso, foram cruzados os indivíduos 1,4,5,7 e 8 (modelos que possuem características formais semelhantes).

**Figura 51** – Geração 2: Cruzamento entre indivíduos com mesma semelhança.



Fonte: acervo do Autor.

Neste contexto, destaca-se a potencialidade da ferramenta no que diz respeito a otimização do processo exploratório, uma vez que o processo de simulação mostrou-se rápido e de certa forma eficaz. Onde gerou-se uma população inicial aleatória, sem que houvesse manipulação prévia das variáveis. Em contrapartida, esta não possibilidade de geração de uma população com critérios já pré-definidos no início na concepção fez com que o processo tornar-se menos eficaz, pois tornou-se necessário maiores tentativas para o primeiro resultado formal satisfatório.

Neste contexto, o indivíduo 4 foi escolhido como a solução mais satisfatória devido a proximidade formal em conjunto ao custo mais baixo em relação aos outros semelhantes. Com isso, avançou-se para a simulação do critério de custo.

#### 4.3.2 Critério de custo

O critério de custo foi o segundo a ser testado na simulação, para isso, aproveitaram-se os resultados oriundos da simulação da otimização formal. Conforme a Figura 52, o indivíduo 4 apresentou um custo elevado referente ao critério a ser atingido, necessitando da otimização da variável. Dessa maneira, por meio da manipulação dos critérios da aba de propriedades, diminuíram-se os valores para a realização de uma nova população.

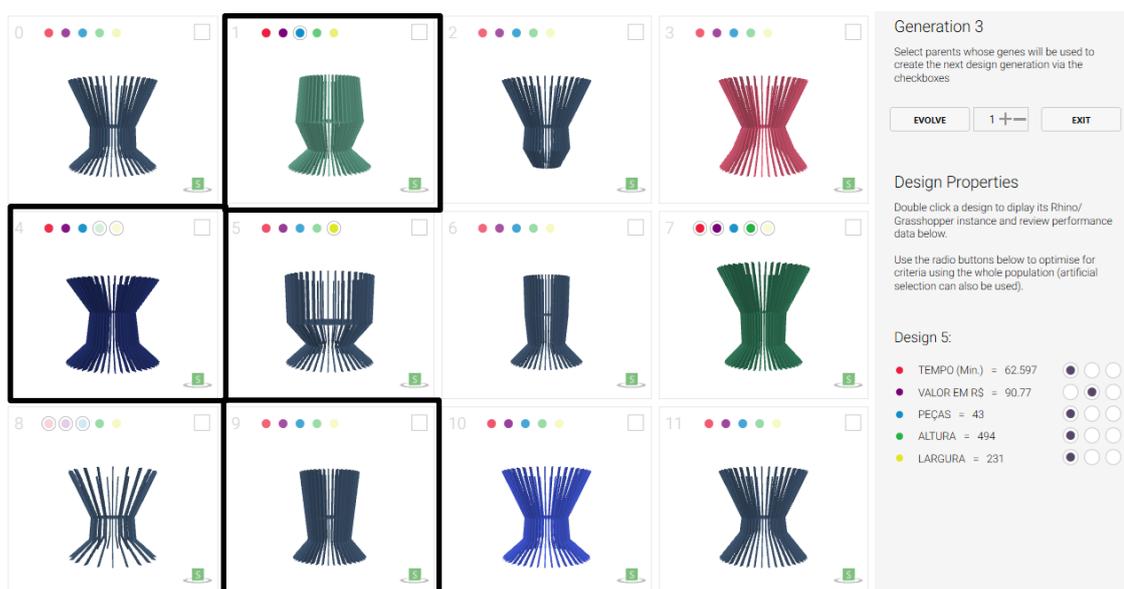
**Figura 52** – Alternativa utilizada para a otimização do critério.



Fonte: acervo do Autor.

A nova população de apenas um indivíduo fez com o que não houvesse uma solução satisfatória (Figura 53), principalmente pela ausência formal prevista anteriormente. Com isso, houve a necessidade da geração de um cruzamento entre indivíduos, para que as características iniciais não fossem perdidas.

**Figura 53** – Geração 3: Família concebida a partir do objeto 4.



Fonte: acervo do Autor.

Diante deste fator, retrocedeu-se para a Geração 2, para a realização de uma nova população entre o cruzamento dos indivíduos 1,4 e 9. O resultado deste

cruzamento gerou uma população com maiores semelhanças formais (Figura 54), porém, ainda com poucas alternativas com proximidade de valores para um resultado satisfatório do critério do custo total.

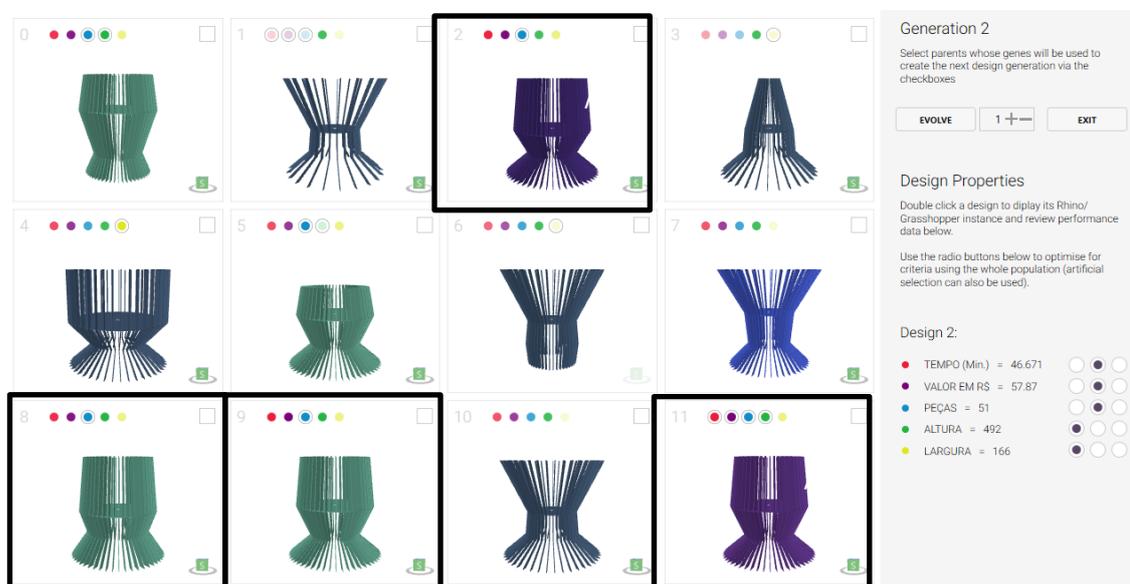
**Figura 54** – Geração 4: Família concebida pelo cruzamento dos indivíduos 1,4 e 9.



Fonte: acervo do Autor.

Diante disso, testou-se a diminuição dos valores relacionados a este critério, como o tempo de fabricação e a quantidade de peças. Dessa maneira, gerou-se um novo cruzamento entre os indivíduos 1, 2, 6 e 10. Com isso, a partir do resultado da nova população (Figura 55) obteve-se uma diminuição considerável para obtenção do critério, principalmente pela manipulação da diminuição das duas variáveis (tempo de fabricação e quantidade de peças).

**Figura 55** – Geração 5: Família concebida pelo cruzamento dos indivíduos 1,2, 6 e 10.



Fonte: acervo do Autor.

Sobretudo, não se obteve um resultado satisfatório para critério do custo final, portanto, houve a necessidade da realização de uma nova otimização. Para isso, cruzaram-se os indivíduos 2, 8, 9 e 11. O cruzamento destes indivíduos (Figura 56) gerou uma alternativa (indivíduo 2) com uma considerável diminuição do critério. Contudo, como a ferramenta não possibilita a inserção exata do valor desejado, houve disparidades entre os valores desejados. Neste contexto o processo tornou-se incerto e sem perspectiva de um resultado exato. Outro fator culminante, foi a pouca geração de novas alternativas formais, visto que o processo de cruzamento criou elos e parentescos bem estabelecidos, isto tornou a otimização com pouca variação, transformando em um processo mais estático (é possível alterar o valor da taxa de mutação apenas no início do processo).

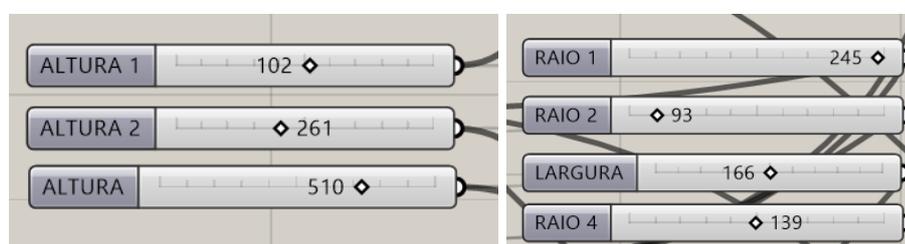
**Figura 56** – Geração 6: Família concebida pelo cruzamento dos indivíduos 2, 3, 5, 6, 7, 10 e 11.



Fonte: acervo do Autor.

Com isso, neste contexto, testou-se a ferramenta Galápagos, com a intenção de ranquear as melhores alternativas do critério de custo sem que houvesse uma alteração dos valores formais. Para isso, os valores dos *Genome* (variáveis) foram preenchidos apenas com os *sliders* correspondentes à espessura da chapa e ao número de peças, uma vez que estes valores são proporcionais ao valor de custo. Visto que o critério formal já fora atingido, nenhuma variável (Figura 57) dimensional (raios e alturas) foi interligada ao *Genome*.

**Figura 57** – Valores utilizados para a realização da otimização.

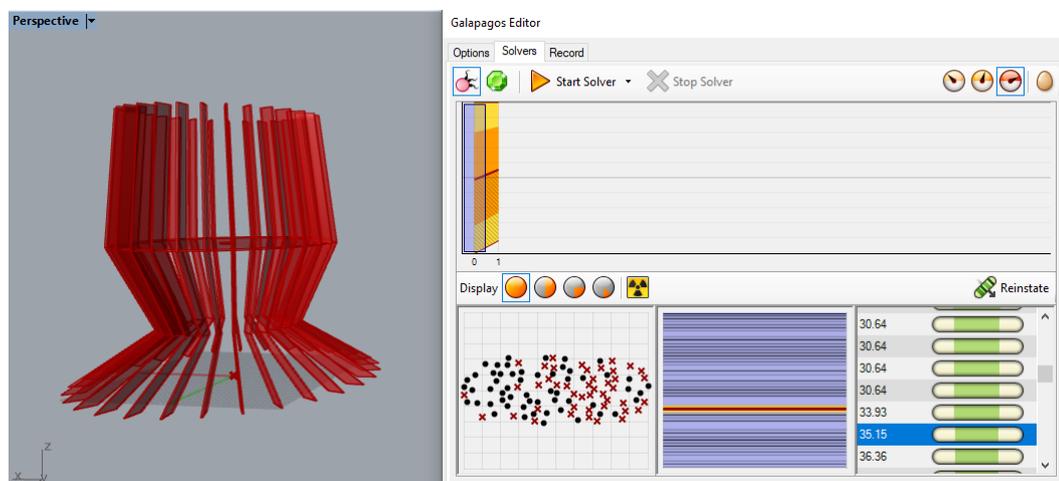


Fonte: acervo do Autor.

O resultado da simulação (Figura 58) foi de um valor de *fitness* de 35.15, alcançando o critério desejado. O tempo total do processo de otimização foi de 2

minutos e 32 segundos. A eficácia e precisão da ferramenta deve-se ao conjunto de critérios previamente atingidos com o uso da ferramenta *Biomorpher*.

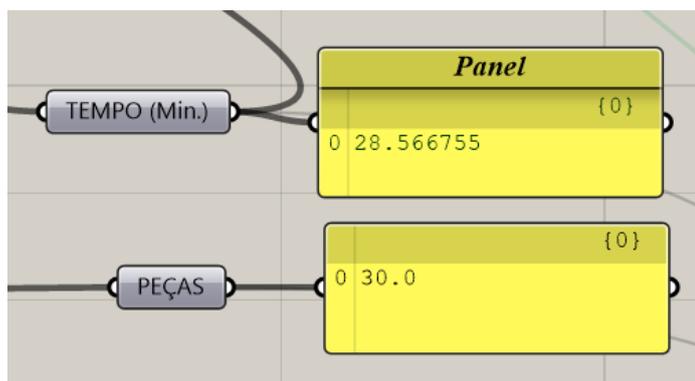
**Figura 58** – Resultado da simulação da ferramenta *Galapagos*.



Fonte: acervo do Autor.

O resultado da simulação realizada pela ferramenta Galápagos foi satisfatório, porém, a otimização só foi eficiente diante da união de ambas ferramentas generativas. Contudo, não se obteve um resultado satisfatório para o critério de tempo total de corte laser. O valor da variável foi de 28 minutos e 56 segundos (Figura 59), com isso, necessitou-se da otimização deste critério.

**Figura 59** – Valores utilizados para a realização da otimização.



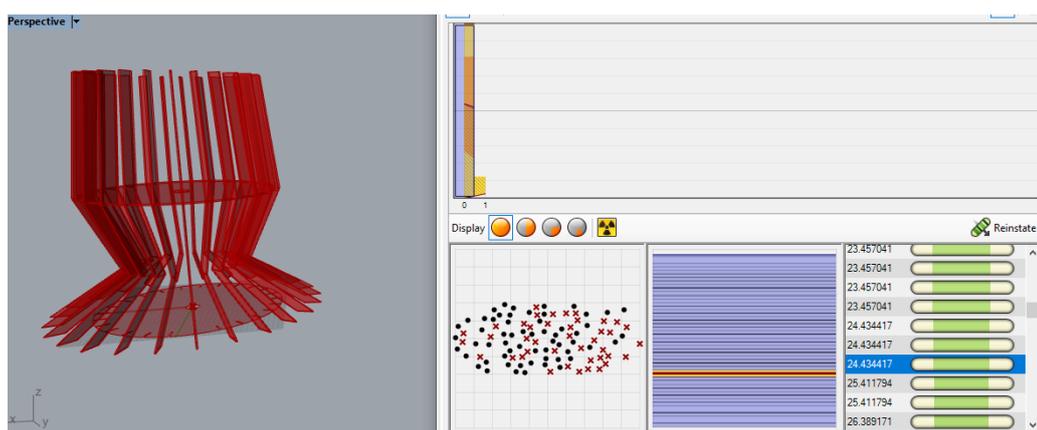
Fonte: acervo do Autor.

Diante deste fator, o tempo de fabricação foi o último critério a ser explorado, devido a ordem adotada previamente (fator de decisão do projetista) quanto aos critérios mais importantes e pelo não acerto total do critério posterior.

### 4.3.3 Critério do tempo de corte a laser

O resultado do critério de tempo de fabricação por corte a laser, deu-se pela simulação da ferramenta Galápagos. Sobretudo, a ferramenta não possibilitou a inserção de dois ou mais valores no *input fitness*, dessa maneira, a lógica para a otimização deu-se pela escolha de um tempo menor em relação ao resultado do critério anterior (28 minutos e 56 segundos). Com isso, alguns dos critérios secundários (descrito no item 3.2) foram alterados para a diminuição do tempo de fabricação por corte a laser. No caso, escolheu-se a variável do número de peças, visto que, a mesma não alterou o critério formal (principal item) de maneira significativa. Dessa maneira, obteve-se como resultado a alternativa satisfatória de 24 minutos e 43 segundos (Figura 60) de tempo de fabricação.

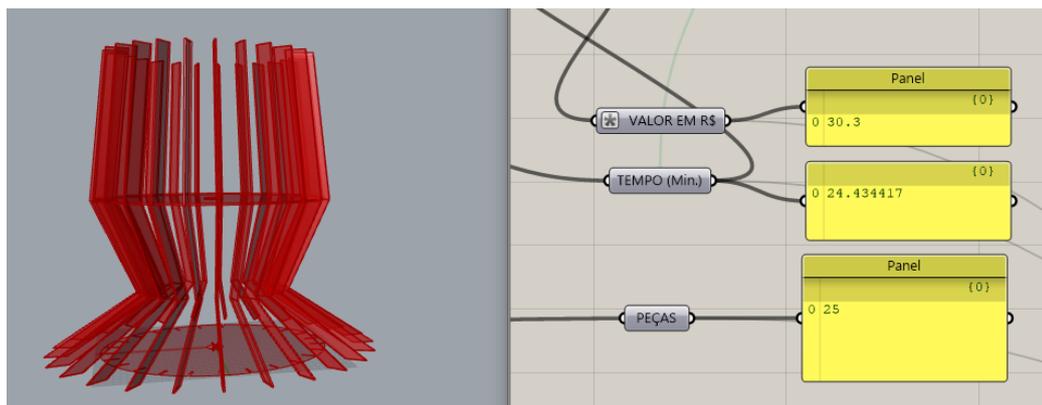
**Figura 60** – Gráficos de visualização da execução do algoritmo.



Fonte: acervo do Autor.

Sobretudo, devido a relação paramétrica entre as variáveis dos critérios, houve uma diminuição do número de peças para o valor de 25, da mesma maneira, diminuiu-se o critério do custo final para o valor de 30,3. Com isso, os resultados finais (Figura 61) foram: 24 minutos e 43 segundos de tempo de fabricação, quantidade de 25 peças e um custo de 30,3 reais (valor fictício).

**Figura 61** – Alternativa satisfatória.



Fonte: acervo do Autor.

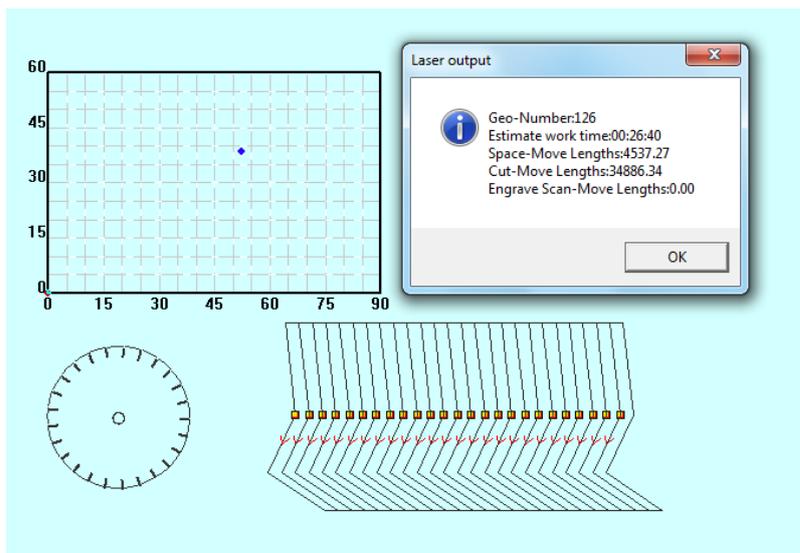
Dessa maneira, os resultados satisfatórios de todos os critérios principais foram atingidos, sobretudo, ressalta-se que ambas ferramentas necessitaram de um processo lógico com variáveis e parâmetros bem definidos. Este fator foi determinante para o sucesso da simulação. Por fim, como intenção desta pesquisa é testar de forma completa o uso das ferramentas generativas na otimização no como um todo, desde sua concepção a sua fabricação, destaca-se a seguir o item da fabricação por corte a laser.

#### 4.4 CORTE A LASER

O resultado da materialização serviu como validação do algoritmo para o teste do processo total da concepção da produção. De certa forma, foi possível testar a simulação virtual do valor do tempo total de corte a laser.

No primeiro momento, testou-se o algoritmo com a utilização da simulação virtual realizada pela ferramenta *LaserCut 5.3* e pela ferramenta *DWorksV8*, ambas com a função de manipular a máquina. O primeiro resultado (Figura 62) foi um tempo de 26 minutos com 40 segundos.

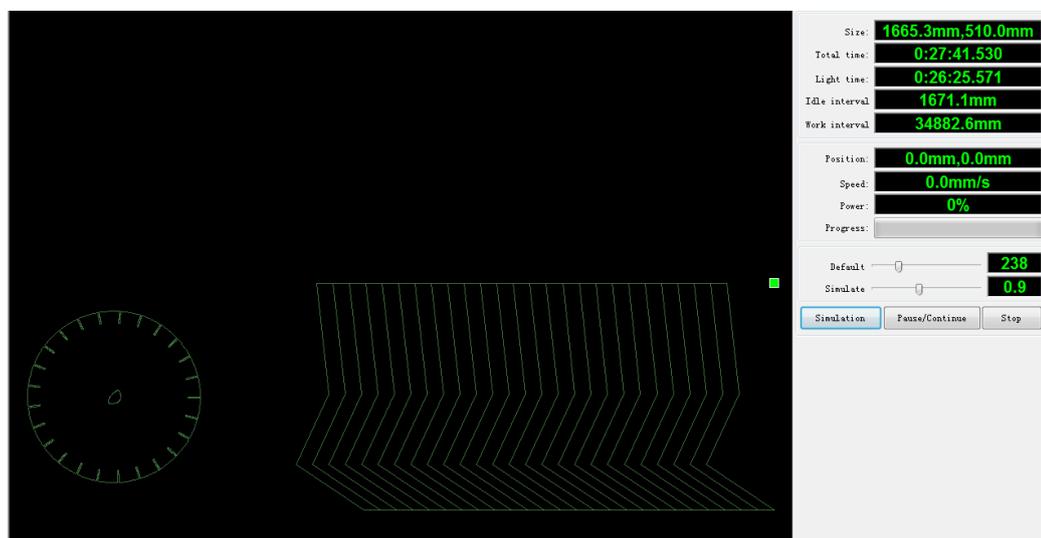
**Figura 62** – Tempo de corte a laser segundo LaserCut 5.3.



Fonte: acervo do Autor.

Já na segunda simulação, como destacado na Figura 63, o tempo previsto para a realização do corte foi de 27 minutos e 40 segundos. Em ambos os casos, as potências e velocidades foram mantidas conforme destacado no item 3.3.2. Com isso, destaca-se uma diferença de 2 a 3 minutos em relação ao tempo previsto no algoritmo.

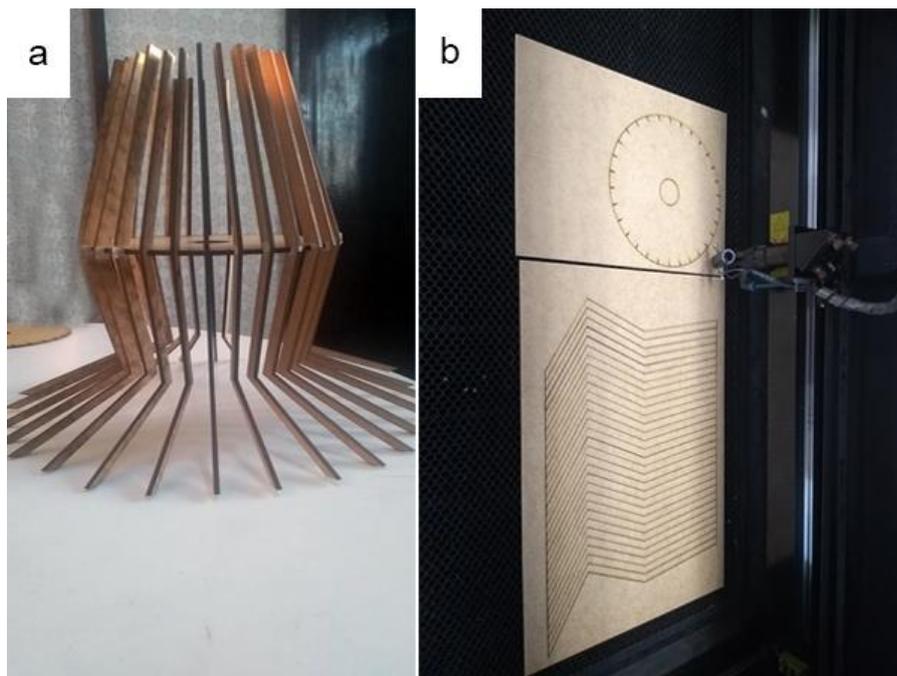
**Figura 63** – Tempo de corte a laser segundo DWorksV8.



Fonte: acervo do Autor.

O resultado foi a materialização de 26 peças (25 verticais e 1 horizontal) de MDF com espessura de 3mm (Figura 64).

**Figura 64** – Montagem (A) e Fabricação (B).



Fonte: acervo do Autor.

O tempo real para a realização do corte foi o mesmo previsto na simulação do *LaserCut 5.3* (software controlador da máquina). Em contrapartida, as dimensões do objeto foram reduzidas para a escala 1:2, em virtude das dimensões da máquina, bem como a utilização de menores quantidades de materiais.

Ao total, foram realizados 4 procedimentos de impressões para a realização do ajuste da espessura correta do encaixe do material (sem que houvesse necessidade de algum tipo de colagem), uma vez que, há um acréscimo nas dimensões das aberturas devido ao feixe de luz (cerca de 1mm de espessura). Com isso, diminuiu-se o valor previsto (no algoritmo) para a espessura da chapa de 3mm para 2,8mm, dessa maneira, o encaixe deu-se de maneira perfeita.

#### 4.5 FERRAMENTAS GENERATIVAS EM PROCESSOS TRADICIONAIS

Neste item são expostos os resultados das análises da possível inserção e dos sistemas generativos como o desenho paramétrico e os algoritmos evolutivos (e suas ferramentas) aos processos tradicionais de projeção do design de produto (Figura 65).

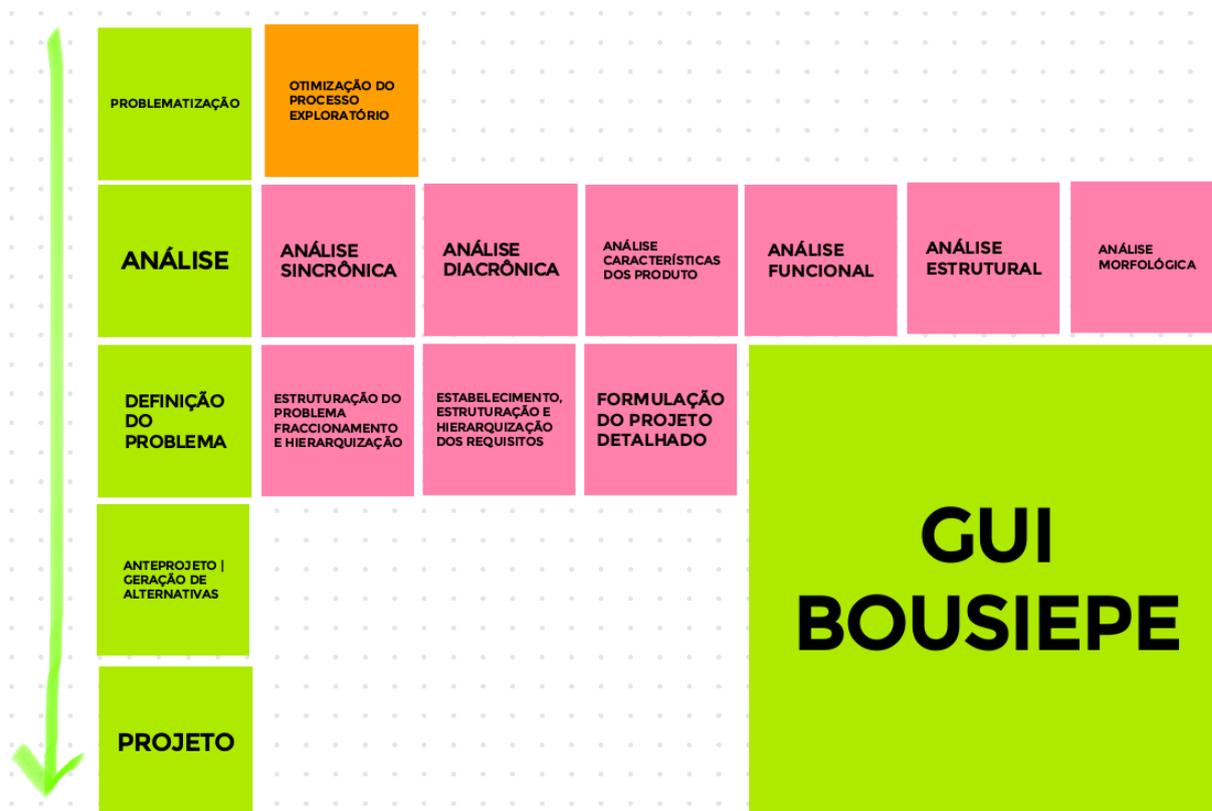
**Figura 65** – Processos tradicionais analisados.

Fonte: acervo do Autor.

O modelo do projeto em Design de Gui Bonsiepe no final dos anos 70, destaca a macroestrutura do processo. A estrutura do modelo divide-se em etapas denominadas como: problematização, análise, definição do problema, anteprojetogeração de alternativas e projeto, dessa maneira, o autor destaca a ideia de uma sequência de série de passos, uma vez que, o mesmo defende a não linearidade do processo (BONSIEPE, 1984; PAZMINO, 2010, CELUPPI, 2018). Da mesma forma, em que Vieira (2014) destaca que um sistema generativo é “um processo morfogênico que usa algoritmos estruturados como sistemas não lineares para resultados únicos, infinitos e sem repetição realizados por uma ideia-código”.

A primeira etapa do modelo do processo de Bonsiepe, retrata a problematização, neste ponto, o autor não especifica de forma detalhada os procedimentos para a sua realização. Quanto a análise, para esta pesquisa o modelo generativo foi utilizado, análise funcional e análise morfológica. Visto que o resultado destas coletas de dados serviu como apoio para a concepção dos critérios como os limites e variáveis do modelo parametrizado. Com isso, acredita-se que o desenho paramétrico pode inserir-se nesta etapa (Figura 66), como uma ferramenta de armazenamento e manipulação de informações (PAZMINO, 2010, BONSIEPE, 1984; MARTINO 2015, CELANI, 2003).

**Figura 66** – Modelo de Gui Bonsiepe.



Fonte: acervo do Autor.

Quanto a etapa 3 do modelo de Bonsiepe, referente a definição do problema, destaca-se em cor laranja (Figura 67) a possível inserção das ferramentas neste item do processo. O método generativo necessitou de uma lista de requisitos para a ordem da simulação de otimização, para isso, as metas foram orientadas conforme a definição de critérios alvos, sendo eles principais ou auxiliares. Dessa maneira, as matrizes foram valorizadas conforme o peso, que no caso dos critérios do método generativo a ordem deu-se pela priorização da forma, custo e tempo respectivamente (BONSIEPE, 1984; HARDING E OLSEN 2018).

**Figura 67** – Definição do problema quanto ao modelo de Bonsiepe.

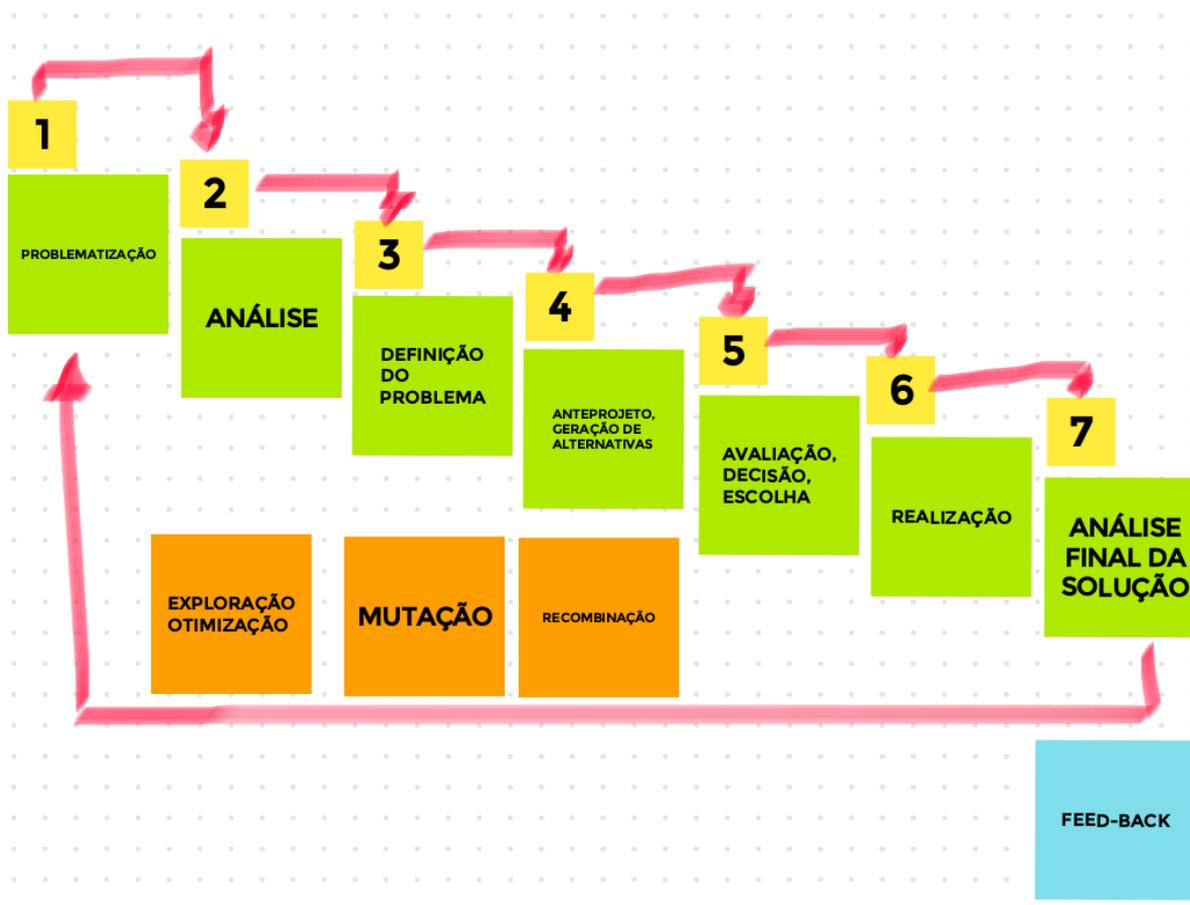


Fonte: acervo do Autor.

Nas etapas seguintes do modelo de Bonsiepe (Figura 68) como o anteprojetos, geração de alternativas, avaliação, decisão, escolha e realização do produto. O autor descreve algumas ferramentas para a criação do conjunto de possibilidades, como uso de maquetes, desenho, esboços, brainstorming, entre outras. Neste contexto, o auxílio das ferramentas generativas pode ser válido, visto que, conforme os resultados da exploração, destacou-se a eficiência da geração de uma grande população de alternativas assistida pela ferramenta *Biomorpher*. Bonsiepe destaca também, a não linearidade do processo para que haja maiores interações de mudanças em etapas iniciais do projeto (CELUPPI, 2018). Neste aspecto, retrata-se a principal característica do sistema generativo evidenciada nos experimentos, a otimização das alternativas. Este fator foi culminante para a avaliação, decisão e escolha do produto satisfatório. Visto que, ao longo do processo, obtiveram-se mutações, retrocessos e avanços de novas gerações de alternativas. Sobretudo, destaca-se a importância da

materialização do produto por meio da fabricação digital por corte a laser, este fator foi culminante para a criação de critérios para avaliação e otimização das alternativas.

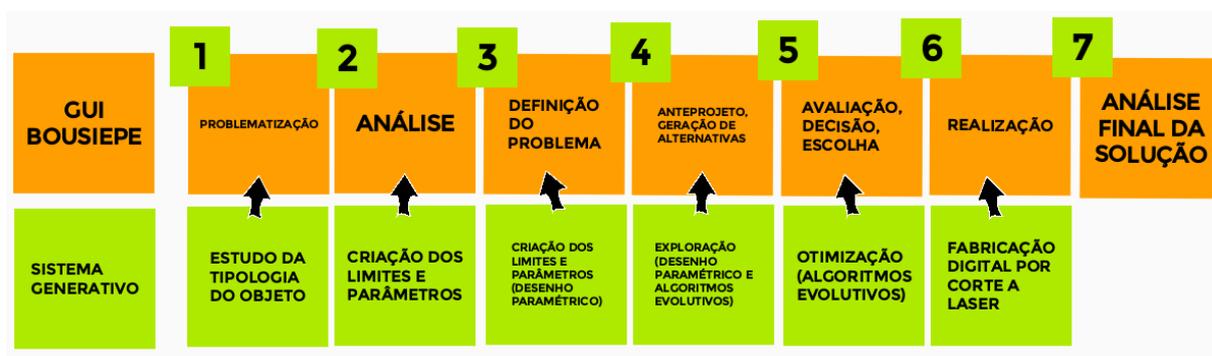
**Figura 68** – Processo de feed-back de Bonsiepe.



Fonte: acervo do Autor.

Neste contexto, por meio do resultado dos experimentos e conforme análise do modelo de Bonsiepe, destaca-se na Figura 69, a inserção do sistema generativo como uma ferramenta de auxílio no modelo tradicional de Bonsiepe. Diante disso, destaca-se a importância de etapas prévias como a problematização e análise do problema, para a execução eficaz de uma otimização ao processo exploratório.

**Figura 69** – Inserção do sistema generativo no modelo de Bonsiepe.



Fonte: acervo do Autor.

Em relação ao sistema de Baxter (2002), o modelo do processo de desenvolvimento de um produto está voltado a oportunidade de negócios (PAZMINO, 2010). Com isso, conforme os resultados adquiridos nas simulações desta pesquisa, mesmo que superficialmente, pode-se realizar uma relação de custo. Sobretudo, ao contrário deste trabalho, e conforme Baxter, todos os valores exatos referentes a fabricação do produto deveriam ser calculados, bem como, expectativas, aceitação e análise mercadológica do produto. Porém, para esta pesquisa, aplicou-se apenas um breve critério do valor final ao produto, mesmo que superficialmente, mas, com potencialidade de ser explorado posteriormente com alimentação de variáveis financeiras.

O autor apresenta em seu modelo, um funil de decisões (BAXTER, 2002). Diante deste aspecto, os sistemas generativos podem auxiliar de forma a otimizar este processo. Visto que, conforme os experimentos, há possibilidade da realização de testes do universo das oportunidades diante de uma população conhecida (MARTINO, 2015, HARDING E OLSEN, 2018). Em contrapartida, o melhor comportamento do desenho paramétrico e dos algoritmos evolutivos se daria à escolha do melhor conceito e melhor configuração (fatores evidenciados no teste do critério formal, custo e tempo de fabricação). Os demais fatores do modelo de Baxter, dependeriam de maiores respaldos de informações estratégicas e financeiras às variáveis do produto (CELUPPI, 2018).

Diante disso, demarcou-se o uso dos sistemas generativos como possíveis auxiliares nas etapas de validação e especificação (Figura 70), ou seja, a avaliação inicial do produto, bem como seus critérios e demarcações. Uma vez que, também

foram demarcados a modelagem paramétrica e os algoritmos evolutivos nas etapas do projeto conceitual e detalhamento. E o corte a laser como engenharia de produção neste item testou-se o corte a laser como protótipo e não há um sistema de produtivo como retrata Baxter (PUPO, 2009).

**Figura 70** – Inserção dos sistemas generativos no modelo de Baxter.



Fonte: acervo do Autor.

Neste contexto, em comparação ao modelo de Baxter (Figura 71) os sistemas generativos podem auxiliar na diminuição do risco financeiro do desenvolvimento de um produto, uma vez que, como retrata Baxter (2002), os custos aumentam substancialmente conforme a medida em que o progresso do processo aumenta. Para isso, as etapas de exploração bem como a otimização com valores finais descritos, podem diminuir este risco.

**Figura 71** – Inserção no modelo de funil de decisões de Baxter.



Fonte: acervo do Autor.

O modelo de processo de Lobach (2001) identifica que o processo criativo é um sistema de soluções de problemas e para sua resolução, necessita-se de informações e critérios de avaliações bem definidos (Figura 72). Neste contexto, na fase de preparação exposta por Lobach (2001), definem-se as informações por meio da análise de configuração, como critérios de aparência estética e critérios estruturais, como dimensões e forma construtiva. Todos estes aspectos foram necessários para a concepção das simulações do sistema generativo, como a determinação da tipologia do objeto, criação dos parâmetros e critérios.

A segunda fase destaca-se pela geração de alternativas. Neste período do modelo, o processo exploratório gerado pelo SG assume grande importância, pois, é neste período onde geram-se as alternativas prévias sem julgamento. O autor cita também, a combinação das alternativas (fator importante proporcionado pelo cruzamento e mutação dos resultados). Para isso, relacionou-se para esta etapa, o uso do desenho paramétrico e dos algoritmos evolutivos na produção de ideias (exploração) (LOBACH, 2001, MARTINO 2015, HARDING E OLSEN).

Figura 72 – Inserção dos sistemas generativos no modelo de Lobach.



Fonte: acervo do Autor.

Na terceira etapa, demarcou-se principalmente o uso das ferramentas evolutivas, visto que o autor cita como a etapa de iluminação, ou seja, avaliação das soluções. Estas características foram exploradas nas simulações de otimização do sistema generativo. A quarta e última etapa, realiza-se a realização da solução, ou

seja, a materialização do produto, para isso, destaca-se o processo de planificação das peças, bem como sua fabricação por corte a laser.

#### 4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Em um primeiro momento, o resultado da concepção do modelo virtual parametrizado foi de suma importância para o andamento das simulações, uma vez que, evidenciaram-se as dimensões mínimas e máximas do objeto, bem como, a quantidade das variações formais resultantes do desenho paramétrico. A partir de então, pode-se expandir a visualização dos resultados destes modelos por meio da exploração das possibilidades assistidos pelas ferramentas evolutivas. Com isso, realizaram-se as gerações de alternativas por meio de otimizações do processo exploratório, demarcado por critérios formais, de custo e tempo de fabricação. Neste contexto, escolheu-se a alternativa satisfatória para a materialização do produto por meio da fabricação por corte a laser, a fim de testar o método no processo de concepção a produção final. Por fim, as simulações possibilitaram resultados para analisar a inserção e união destas ferramentas generativas aos modelos processos tradicionais de projeção do design de produto.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do desenho paramétrico possibilitou a criação de um ambiente em que todas as variáveis estivessem interligadas, fazendo com que o modelo pudesse ser modificado ao longo do processo, sem que perdesse suas características iniciais. Sobretudo, devido ao amplo campo de possibilidades geradas pelo acúmulo de parâmetros, o processo manual de escolha da alternativa satisfatória tornou-se inviável. Para isso, testou-se a otimização do processo exploratório destas alternativas. O desenho paramétrico do ambiente foi concebido com o auxílio do *software Grasshopper®* assistido pelas ferramentas *Biomorpher* e *Galápagos*. Ambas as ferramentas possuem conceitos baseados nos algoritmos evolutivos. Estes foram importantes para a realização da exploração e otimização das alternativas por meio da geração, mutação e recombinação de uma população de indivíduos.

A ferramenta *Biomorpher*, possui um mecanismo de visualização e classificação de um grupo de resultados, que facilitou na otimização das alternativas. A ferramenta auxiliou no processo exploratório de projeto de forma eficiente, visto que, ofereceu a visualização de um conjunto de famílias com características distintas, isto fez com que o grande número de possibilidades iniciais de uma população fosse reduzido. Com isso, obteve-se expressivos resultados exploratórios em um curto espaço de tempo. Contudo, de certa forma, foi observado que o processo pode influenciar à dois distintos caminhos exploratórios, ambos com taxonomias de problemas com critérios mal definidos. O primeiro caminho pode influenciar a confusão mental do projetista, visto que a ferramenta trabalha com as doze primeiras alternativas geradas randomicamente. Isto torna-se um fator negativo, pois a escolha do resultado esperado pode gerar uma certa dispersão ao projetista, diante à tantas possibilidades. O segundo caminho torna-se positivo, pois auxilia na criação de alternativas não imaginadas ao projetista, abrindo campos inexplorados e inesperados.

Em contrapartida, quando a taxonomia do problema possui critérios bem definidos (estudados nesta pesquisa), o comportamento da ferramenta tornou-se mais eficaz. Uma vez que, diante dos critérios pré-estabelecidos geraram-se otimizações com maiores graus assertivos. Sobretudo, notou-se que o acúmulo de gerações com características semelhantes tornou o processo repetitivo, sem que houvesse novas

possibilidades, visto que a ferramenta não possibilita a inserção de critérios alvos iniciais e sim uma otimização gradativa ao longo do processo de cruzamento dos indivíduos. Dessa maneira foi necessário a utilização da ferramenta *Galápagos*.

O uso da ferramenta *Galápagos* possibilitou um ranqueamento das melhores alternativas por meio de um critério de avaliação. Dessa maneira, foi possível encontrar a solução satisfatória por meio da aplicação do processo evolutivo. Neste caso, após o encontro da alternativa satisfatória referente ao critério formal, congelaram-se os parâmetros de auxiliares dos modelos, isso fez com que apenas os critérios de quantidade de peças fossem modificados, com isso, não se alterou o aspecto formal da alternativa, e por consequência possibilitou a resolução de um resultado satisfatório. Vale ressaltar, que a decisão do congelamento ou não de parâmetros foi resultado da ordem dos critérios estabelecidos previamente.

Neste contexto, após a realização dos experimentos, pode-se analisar a inserção das ferramentas generativas em processos tradicionais de projeção no design de produto. Com isso, destacou-se que na maioria dos casos, teoricamente, o sistema generativo pôde ser inserido como uma ferramenta de otimização do processo exploratório nos métodos tradicionais de projeção do design de produto. No modelo de processo de Bonsiepe a inserção dos SGs, pôde ser melhor destacada principalmente como uma ferramenta de geração de alternativas, referentes à etapa 4 do processo, uma vez que se exploram as possibilidades, também, destaca-se a otimização como um fator de avaliação e decisão de escolha (etapa 5), principalmente pela possibilidade do feed-back próprio do conjunto generativo, ou seja, a geração e mutação de novas populações. Em comparação ao modelo de Baxter, a inserção da ferramenta concentra-se nas etapas de conceituação e detalhamento do produto, ainda que, o autor destaca estratégias de vendas e neste contexto a algoritmo possibilitou a inserção de valores de custo da fabricação. Acredita-se que neste aspecto a ferramenta generativa pode ser mais bem explorada se utilizada em união a este modelo. Por fim, no último modelo analisado, o de Lobach, obteve-se o maior grau de compatibilidade, visto que o processo se articula pela criação e avaliação das alternativas diante de critérios bem definidos.

A intenção desta pesquisa foi a contribuição para disseminação das ferramentas generativas com apoio de conceitos já amplamente estudados e conhecidos. Isto demonstrou a aplicabilidade da ferramenta em conjunto aos

processos tradicionais, principalmente para a concepção de um número significativo de alternativas, ou seja, um processo exploratório, desde a concepção e fabricação do produto.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são destacadas as considerações sobre as oportunidades de continuidade desta pesquisa.

- Realizar experimentos didáticos como *workshops* para a análise do processo;
- Aprofundar os estudos sobre os critérios principais, como a utilização reais de custo sobre material, fabricação e mão de obra;
- Adicionar critérios como índice luminoso e fatores de luminosidade, principalmente com adições de novos materiais como o acrílico.
- Desenvolver um método sistemático para a criação de um componente no software *Grasshopper*.

## REFERÊNCIAS

AGKATHIDIS, A. **Diseño Generativo**: processos para concebir nuevas formas arquitectónicas. Barcelona: Promopress, 2016.

ANTON, I; TANESE D. **Informed Geometries. Parametric Modelling and Energy Analysis in Early Stages of Design**. Sustainable Solutions for Energy and Environment, EENVIRO -, 18-20 November, Bucharest, Romania, 2016.

BAHIA, I. CAMPOS, M. **Metodologia de design: ganhos da engenharia para a solução de problemas complexos**. 12º P&D Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design. Vol. 9, 2016, p. 1429-1439.

BARBOSA NETO, W. Fabricação Digital: Tecnologias e aplicações. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M. (Org.). **Arquitetura contemporânea e automação**: prática e reflexão. São Paulo: ProBooks, 2018. p. 134-151.

BARROS, N. CARLO, J. Modelagem generativa integrada à eficiência energética: estudo da otimização da forma de edificações institucionais. *Arquitetura Revista*, Vol. 12, 2017, P. 100-111.

BAXTER, M. **Projeto de Produto**: guia prático para o design de novos produtos. São Paulo: Blucher, 2011.

BONSIEPE, G. (coord.). **Metodologia experimental: desenho industrial**. Brasília: CNPq/Coordenação editorial; 82 p. 1984.

BÜRDEK, B. E. **História, Teoria e Prática do Design de Produtos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

BURRY, J.; BURRY, M. *The new mathematics of architecture*. New York: Thames and Hudson, 2010.

CARDOSO, R. **Uma Introdução à História do Design**. 3. Ed. São Paulo: Blucher, 2011.

CARTANA, R. P. PEREIRA, F. O. R. **Elementos De Controle Solar Desenvolvidos Com Modelagem Paramétrica E Algoritmos Evolutivos**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 7, n. 3, 2016, 133-144.

CELANI, G. **Cad criativo**. Rio de Janeiro: Campus, 2003.

CELANI, G. VAZ, C. 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, Vol 1, 2013.

CELUPPI, M.C. MEIRELLES, C.R. **O método Projetual de Bonsiepe (1984) e os encontros disciplinares no Brasil**. Revista Design, Educação, Sociedade e Sustentabilidade, 2018, p. 57-77.

COLOMBO, M. **Maestros de la Arquitectura: Miralles Tagliabue EMBT**. Editora Salvat, Barcelona, 2011.

DA SILVA, L.; BARBIERI, G.; BRUSCATO, U.; DA SILVA, F.P. **O uso do conceito paramétrico aplicado a uma inovação no mobiliário urbano: estudo de caso bicicletário**. SIGraDi 2016, XX Congresso the Iberoamerican Society of Digital Graphics, 2016, p. 337-341.

DARWIN, C. **A origem das espécies e a seleção natural**. Tradução Soraya Freitas. São Paulo: Madras, 2011.

DAWKINS, DINO, I. G. Creative design exploration by parametric generative systems in Architecture. **Metu Journal Of Faculty Of Architecture**, v. 29, n. 1, p. 207-224, 2012.

FAGUNDES, C.M.F.; COSTA, C; G; BRUSCATO, U.; DA SILVA, F.P. **Facade hollow brick (cobogó) 3D scanning: natural light admission analysis and comparison with original digital 3D model**. SIGraDi 2018, XXII Congresso the Iberoamerican Society of Digital Graphics, 2018, p. 596-601.

FISCHER, T.; HERR, C. **Teaching generative design**. Liverpool: University Of Liverpool, 2001.

FLORES, R. SCHULER, J.P. A evolução dos algoritmos mentais. In: **Ciência & Ambiente**. Santa Maria: Editora Pallotti, 2008. p. 151-157.

FLORIO, W. Modelagem paramétrica, criatividade e projeto: dias experiências com estudantes de arquitetura. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v.6, n.2, p. 43-66, 2014.

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. 43-66, dez. 2012.

FONSECA FILHO, C. **História da Computação**: o caminho do pensamento e da tecnologia. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

FRAZER, J. **Parametric Computation: History and future**; Architectural Design, Vol 86, 2016, p. 18.23.

GABRIEL, P.; DELBEM, A. **Fundamentos de Algoritmos Evolutivos**. São Paulo: Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, USP, 2008.

GARBER, R. **Optimisation Stories: The Impact of Building Information Modelling on Contemporary Design Practice**. Architectural Design: Closing the Gap. Information Models in Contemporary Design Practice, Londres, v. 79, n. 2, p. 6-13, Mar-Abr 2009. ISSN

HEIDARI, A. SAHEBZADEH, S. **Parametric Architecture In It's Second Phase of Evolution**. Journal of Building Performance Simulation, Fev, 2018.

HENRIQUES, G. L. T. de C. Tetra Script: sistema de aberturas responsivo para controlar a luz, de acordo com fatores externos e internos. 2013. 448 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2013.

HENRIQUES, G.; PASSARO, A. Arquitetura algorítmica: técnicas, processos e fundamentos. In: IV ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, 4., 2016, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2016. não paginado.

HENRY, J. A Revolução Científica e as origens da Ciência Moderna. Rio de Janeiro: Zahar, 1998.

HUMPIRI, C. J. P. Estratégias Evolutivas no Planejamento Energético da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência. 2005. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

ISAACSON, W. **Os inovadores**: uma bibliografia da revolução digital. São Paulo: Companhia das Letras, 2014.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the Digital Age**: design and manufacturing. Londres: Taylor & Francis, 2005.

KOWALTOWSKI, D. **Processo de Projeto em Arquitetura: da teoria à tecnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2006.

LÖBACH, B. **Design Industrial**. Bases para a configuração dos produtos industriais. Editora Edgard Blucher, Rio de Janeiro, 2001.

MAININI, Andrea G. **Computational design and parametric optimization approach with genetic algorithms of an innovative concrete shading device system**. International High- Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16). iHBE 2016.

MALDONADO, T. **Design Industrial**. Lisboa: Bertrand, 2009.

MARTINO, J. **Algoritmos evolutivos como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura**. 2015. 282 f. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

\_\_\_\_\_. Algoritmos evolutivos: aplicações em uma estrutura para sombreamento. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M. (Org.). **Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão**. São Paulo: ProBooks, 2018. p. 85-98.

\_\_\_\_\_. Complexidade e arquitetura. In: CELANI, M.G. C.; SEDREZ, M (Org.). **Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão**. São Paulo: Pro Books, 2018. p. 21-24.

\_\_\_\_\_. **Projetando e fabricando a complexidade**. Entrevista com Florian Gauss. In: CELANI, M.G. C.; SEDREZ, M (Org.). **Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão**. São Paulo: Pro Books, 2018b. p. 161-166.

MEREDITH, M. **From control to design**. Barcelona: Actar, 2008.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. 3th ed. New York: Springer, 1996.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge: The MIT Press, 1999

MITCHELL, M. J. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge: The MIT Press, 1999.

\_\_\_\_\_. **Algorithmic architecture**. Nova York: Routledge, 2006

MITCHELL, W. **A new Agenda of Computer Aided Architectural Design**. The Electronic Design Studio: Architectural Knowledge and Media in the Computer Era CAAD Futures '89 Conference Proceedings, 1989.

OLASOV. **A Model for Design and Analysis of Systems Built Buildings**. 1987. 97F (Mestrado em Arquitetura – Massachusetts Institute of Technology, Nova Iorque, 1987.

OXMAN, R. Theory and Design in the First Digital Age. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 229-265, 2006.

PAZMINO, Ana Veronica; Couto, MARIA RITA de Souza. **Modelo de Ensino de Métodos de Design de Produtos**. Rio de Janeiro, 2010. 450p. Tese de Doutorado – Departamento de Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

POZO, A.; CAVALHEIRO, A.; ISHILDA, C., SPINOSA, E.; RODRIQUES, E. **Computação evolutiva**. Curitiba: Departamento de Informática, UFPR, 2011.

PUPPO, R. **Inserção da prototipagem e fabricação digitais no processo de projeto**: um novo desafio para o ensino de arquitetura. 2009. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

QINGSONG, Ma; FUKUDA, Hiroatsu. Parametric office building for daylight and energy analysis in the early design stages. **Urban Planning and Architecture Design for Sustainable Development**. UPASDS 14-16 October 2015.

SALZANO, F. M. Perspectiva sobre o pensamento evolutivo. In: **Ciência & Ambiente**. Santa Maria: Editora Pallotti, 2008. p. 5-10.

SANTOS, N. M. Integração de Biónica em Design do Produto: modelo de design generativo e paramétrico em estruturas efêmeras. 2014. 121 f. Dissertação (Mestrado em design do Produto) – Faculdade de Arquitectura, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

SEDREZ, M. **Arquitetura e complexidade**: a geometria fractal como o sistema generativo. 2015. 284 p. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

SILVA JÚNIOR, F. A. da. **O uso de sistemas generativos como instrumento de desenho urbano sustentável**. 285 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo – Faculdade de Arquitetura, Universidade de Brasília, Brasília, 2016).

STRICKLAND, C. **Arquitetura Comentada: Uma breve Viagem Pela História da Arquitetura**. Ediuro, Rio de Janeiro, 2003.

STUMPP, M. **A simetria modular e as vilas de Andrea Palladio**. 2013, Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013).

TEDESCHI, Arturo. **AAD\_Algorithms Aided Design**. Parametric Strategies using *Grasshopper*. Edizioni Le Pensur, Rome, 2014.

TERZIDIS, K. **Expressive Form: a conceptual approach to computational design**. Nova York: Routledge, 2003.

VETTORETTI, A. **Bancos para ler e conversar: parâmetros de projeto para sistema de design generativo**. 2010, Dissertação (Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia e Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-Graduação em Design. Porto Alegre, 2011).

VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

WAZLAWICK, R. S. **História da Computação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

ZANI, Andrea; ANDALORO, Michele; DEBLASIO, Luca; RUTTICO, Pierpaolo;  
ZUBEN, F. **Computação Evolutiva: uma abordagem pragmática**. In: JORNADA DE ESTUDOS EM COMPUTAÇÃO DE PIRACICABA E REGIÃO, 1., Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, 2000. p. 25-45.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), responsável pela bolsa de Mestrado concedida, para desenvolvimento da pesquisa Sistemas Generativos como ferramentas de otimização no processo exploratório no design de produto, sob orientação da Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Underléa Miotto Bruscato, no programa de pós-graduação em Design (PGDesign) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.