



UNIVERSIDADE
LUSÓFONA
D O P O R T O

Jordana Caroline de Souza Moreira

O desenho paramétrico como metodologia de apoio à prática arquitetónica: o exemplo da otimização do conforto térmico dos edifícios.

Trabalho realizado sob orientação do:

Prof. Doutor Vítor Manuel Araújo de Oliveira

outubro 2022



UNIVERSIDADE
LUSÓFONA
D O P O R T O

Jordana Caroline de Souza Moreira

O desenho paramétrico como metodologia de apoio à prática arquitetónica: o exemplo da otimização do conforto térmico dos edifícios.

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura, no curso de Mestrado Integrado em arquitetura, conferido pela Universidade Lusófona do Porto.

Dissertação defendida em provas públicas na Universidade Lusófona do Porto no dia 24/10/2022, perante o júri seguinte:

Presidente: Prof. Doutor Pedro Cândido Almeida de Eça Ramalho (Professor Catedrático da Universidade Lusófona do Porto)

Arguente: Prof. Dr. Eng. Rui Ramalhete Moutinho Furtado (Professor Associado Convidado da Universidade Lusófona do Porto)

Orientador: Prof. Doutor Vítor Manuel Araújo De Oliveira (Professor Catedrático da Universidade Lusófona do Porto)

outubro 2022

É autorizada a reprodução integral desta dissertação apenas para efeitos de investigação, mediante declaração escrita do interessado, que a tal se compromete.

Agradecimentos

Ao Professor Vítor Oliveira, por quem tive a sorte de ser orientada, agradeço por ter acreditado na proposta para o tema, por todo profissionalismo, disponibilidade, confiança e estímulo necessário à elaboração da presente dissertação.

À Professora Isabel Clara Neves pelo apoio e auxílio complementar que muito somaram para a realização deste documento.

Ao grande Professor Engenheiro Rui Furtado por ter sido sempre como uma lufada de ar fresco ao longo da minha formação nesta instituição.

Ao Leonardo Gindri, por ter ajudado a sanar dúvidas técnicas durante as mentorias de *Grasshopper*.

À família e amigos pela ajuda e motivação.

À minha mãe Luciana e minha companheira Joana por todo apoio e por nunca me terem deixado desistir mesmo nos momentos mais difíceis desta jornada acadêmica. Nada disso seria possível sem vocês.

O meu muito obrigada.

Resumo

Esta é uma dissertação sobre arquitetura paramétrica. A exploração desta abordagem realiza-se através de um enfoque num elemento arquitetónico específico – a fachada do edifício. A fachada de um edifício constitui a fronteira entre o seu interior e o ambiente externo. Por esta razão, pode exercer um papel ativo na autonomia energética e manutenção do conforto dos ocupantes ao permitir o controle da entrada e distribuição da luz natural, além de também ter a função de possibilitar diferentes pontos de vista.

A dissertação centra-se num exercício teórico-prático onde uma fachada é gerada através da utilização de ferramentas paramétricas e aplicação de algoritmos genéticos, tendo como objetivo a otimização dos valores lumíneos no interior do compartimento analisado.

Os resultados deste estudo mostram que tal método pode fornecer não apenas uma alternativa para a composição, mas também uma compreensão bastante completa sobre o desempenho de diferentes opções de design, permitindo ao arquiteto a capacidade de melhor avaliar e comparar diferentes sistemas de sombreamento. Sublinha-se a natureza ilustrativa deste caso de estudo (fachada), sustentando-se a utilização de uma abordagem paramétrica em diferentes âmbitos da prática arquitetónica.

Palavras-chave: Arquitetura paramétrica, design generativo, processo digital de projeto, fachada paramétrica

Abstract

This is a dissertation on parametric architecture. The exploration of this approach is carried out through a focus on a specific architectural element – the facade of the building. The facade of a building forms the boundary between its interior and the external environment. For this reason, it can play an active role in energy autonomy and maintenance of occupants' comfort by allowing the control of the entry and distribution of natural light, as well as having the function of enabling different points of view.

The dissertation focuses on a theoretical-practical exercise where a facade is generated through the use of parametric tools and application of genetic algorithms, with the objective of optimizing the luminous values inside the analyzed compartment.

The results of this study show that such a method can provide not only an alternative to composition, but also a very complete understanding of the performance of different design options, allowing the architect the ability to better evaluate and compare different shading systems. The illustrative nature of this case study (facade) is underlined, supporting the use of a parametric approach in different areas of architectural practice.

Keywords: Parametric architecture, generative design, digital design, parametric facade

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Índice de figuras	6
Capítulo 1 – Introdução	8
1.1 Justificação e enquadramento	9
1.2 Objetivos	10
1.3 Metodologia	11
Capítulo 2 – Contextualização Teórica	12
2.1 Origem do termo	14
2.2 Design Generativo	16
2.3 Caso de estudo: Fábrica de CoBLOgó / SUBDV	18
Capítulo 3 – Conceitos	21
3.1 A importância da iluminação no projeto	22
3.1.1 Índice dinâmico UDI	23
3.2 Diagrama de Voronoi	24
Capítulo 4 – Exercício Prático	26
4.1 Elaboração da fachada paramétrica em <i>Grasshopper</i>	27
4.2 Comparação dos resultados obtidos	31
Capítulo 5 – Conclusão	33
Bibliografia	35
Anexo A – Maquete digital	38
Anexo B – Script em Grasshopper da fachada paramétrica	39

Índice de figuras

- Figura 1 - Estádio de Moretti, maquete e desenhos. 14
Fonte: <https://www.researchgate.net/figure/A-model-of-stadium-N-by-Luigi-Moretti-Exhibited-at-the-1960-Parametric-Architecture>
Acesso em 17/03/2022
- Figura 2 - O Complexo Watergate de Moretti (esquerda) e a maquete com pesos suspensos de Gaudí (direita). 15
Fontes: Respetivamente, <https://www.archdaily.com/889831/the-architecture-of-washington-dcs-watergate-complex-inside-americas-most-infamous-address>
Acesso em 05/05/2022
- https://www.researchgate.net/figure/An-upside-down-force-model-of-the-Colonia-Gueell_fig1_318103333
Acesso em 04/04/2022
- Figura 3 - A escultura do Goldenfish em Barcelona (esquerda) e o Museu Guggenheim de Bilbao (direita). 16
Fonte: Respetivamente, <https://www.architecturaldigest.com/gallery/best-of-frank-gehry-slideshow>
Acesso em 14/07/2022
- <https://www.archdaily.com.br/br/786175/classicos-da-arquitetura-museu-guggenheim-de-bilbao-gehry-partners>
Acesso em 14/07/2022
- Figura 4 - Centro Nacional de Convenções do Catar. 17
Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/01-149285/centro-nacional-de-convencoes-qatar-slash-arata-isozaki>
Acesso em: 05/07/2022
- Figura 5 - Evolving Floor Plans: Planta de uma escola reorganizada conforme otimização das zonas de distribuição. 18
Fonte: https://www.joelsimon.net/evo_floorplans.html
Acesso em: 04/07/2022
- Figura 6 - Fachada do edifício CoBLOgó – SUBDV. 19
Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/874036/coblogo-subdv>
Acesso em 12/04/2022
- Figura 7- Interior do edifício e corte pela fachada. 19
Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/874036/coblogo-subdv>
Acesso em 12/04/2022
- Figura 8 - Montagem da fachada com apoio de guias de papelão. 20
Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/874036/coblogo-subdv>
Acesso em 12/04/2022
- Figura 9 - Padrão Voronoi presente na natureza. 24
Fonte: <https://nyccami.org/voronoi-patterns/>
Acesso em: 01/07/2022

Figura 10 - Fachadas da empresa Alibaba, em Hangzhou, (esquerda) e da Galeria Warminska, em Olsztyn (direita). 25

Fontes: <https://www.archdaily.com/118277/alibaba-headquarters-hassell>

Acesso em: 07/07/2022

<https://www.apaka.com.pl/en/projekty/galeria-warminska>

Acesso em: 06/07/2022

Figura 11 – Projeto arquitetônico e contexto envolvente (o volume que será utilizado para o exercício é representado a cinza-escuro). 28

Fonte: *Google Earth* com edição da autora.

Figura 12 - Pontos geradores e células Voronoi. 29

Fonte: Autora

Figura 13 - Layout final da fachada paramétrica. 30

Fonte: Autora

Figura 14 - Mapas de calor: Fachada sem proteção (esquerda), fachada com elementos de sombreamento genéricos e fachada paramétrica (direita). 31

Fonte: Autora

Tabela 1 - Comparação anual dos resultados por número de sensores e percentual de luz recebida. 31

Fonte: Autora

Gráfico 1 - Comparação anual dos resultados em percentagem de sensores dentro do intervalo de UDI. 32

Fonte: Autora

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Justificação e enquadramento

“As tecnologias digitais vêm se tornando importantes não apenas para uma representação gráfica mais ágil e precisa, mas também para o auxílio às decisões de projeto, através do emprego integrado de recursos como modelagem paramétrica, simulação computacional e algoritmos evolutivos.” (Cartana e Pereira, 2017)

Em decorrência do desenvolvimento não somente da sociedade como um todo, mas especialmente da tecnologia, ao longo das últimas décadas todo o mundo que vivemos modificou-se. Automóveis, eletrônicos, rotinas, alimentação, o conceito de família, o entretenimento e, mais recentemente, a forma de trabalhar. Também na arquitetura podemos identificar fatores de mudança, incluindo o uso de novas abordagens, métodos e ferramentas.

Tópicos como a responsabilidade ecológica da construção já são amplamente discutidos. A arquitetura verde deixou a teoria e o pequeno nicho que habitava para ser, em alguns contextos, obrigatória¹ por questões que ultrapassam a simples preferência dos clientes, como a necessidade de adaptação às mudanças climáticas e melhor utilização dos recursos disponíveis.

A aplicação da abordagem e método paramétrico e das suas ferramentas no processo de “fazer” arquitetura não se limitam apenas à exploração de geometrias complexas e inovadoras, mas também (e talvez mais importante) ao aumento do desempenho e eficiência, diminuição do “retrabalho”² e desperdício durante todo o processo de concepção e execução do projeto, otimizando recursos financeiros e humanos.

Isso é possível através de sua lógica de trabalho que, ao elaborar um projeto com base em parâmetros, permite que os mesmos sejam alterados e conseqüentemente o resultado final modificado, sem a necessidade de o refazer novamente. O que talvez para os projetos de pequeno porte não represte grande perda, mas que, conforme a dimensão e complexidade de um projeto se amplia, também a pertinência e mais-valia do método paramétrico é maximizada.

Um aspeto bastante relevante sobre a utilização das ferramentas paramétricas na arquitetura é a possibilidade de aplicá-las para fins específicos, como a otimização estrutural e espacial, através da lógica de superfície mínima e a tectônica por exemplo, e também para a elaboração de projetos voltados à vertente climática e ambiental, de forma a otimizar ganhos de luz solar e ventilação natural, diminuição dos gastos com aquecimento e/ou resfriamento, visando uma maior autonomia energética, objetivos estes que não estão conectados à exploração da forma, mas que podem dela tirar proveito, resultando em um design fundamentado na utilidade prática.

¹ Entre outros exemplos de grande porte, é possível citar as obras públicas realizadas no Brasil durante a Copa do Mundo de 2014 onde os editais incluíam a obrigatoriedade da certificação LEED.

² Ato ou efeito de retrabalhar; correção ou aperfeiçoamento de uma obra, de um produto, etc. Fonte: infopedia.pt Acesso em 20/07/2022

O último exemplo pede um pouco de atenção se considerado o atual cenário mundial onde as mudanças climáticas e instabilidade política reivindicam cada vez mais que a arquitetura não somente se adapte mas também contribua para a amenização desta problemática, tirando maior proveito dos recursos disponíveis e tornando-se mais eficiente em termos energéticos, uma demanda que já existe e é crescente, algo que é evidenciado pelo surgimento e evolução dos sistemas de certificação de edifícios verdes, tais como BREEAM³ e LEED⁴ além de novas legislações locais, apontando para um futuro onde a responsabilidade ecológica e energética na hora de projetar e construir será um fator mandatório e transversal a todos os projetos.

Desde modo, justifica-se a escolha do tema pela possibilidade criativa ampliada, direcionamento para maior precisão e menor desperdício de materiais e capital humano, potencial para ser utilizada como ferramenta de suporte na tomada de decisão e orientação para resolução de problemáticas específicas, como a vertente energética - mote do exercício que será realizado neste trabalho.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como foco gerar uma reflexão acerca da utilização de novas ferramentas digitais no processo de fazer arquitetura através de uma ótica teórico-prática. Pretende-se inicialmente abordar, brevemente, o que é a arquitetura paramétrica, sua evolução histórica, passando seguidamente para um caso de estudo com relevância para o exercício a desenvolver, e finalmente o exercício onde a aplicabilidade do método será testada.

Sobres os objetivos gerais desta dissertação, como já referido, está a promoção da discussão sobre os novos métodos de projetar que as ferramentas digitais para modelagem paramétrica permitem e suas mais-valias em diferentes vertentes, dentre elas, a luminosa, que por sua vez, reflete sobre os aspetos da otimização energética do edifício e não menos importante, sobre o bem-estar dos utilizadores.

O objetivo específico é a realização de um exercício prático onde uma fachada paramétrica será concebida e testada em comparação a duas outras fachadas sem otimização, de forma a se conseguir aferir, através do índice dinâmico UDI (*Usefull Daylight Illuminances*), a receção e distribuição da luz natural no interior do edifício e logo, a efetividade das ferramentas paramétricas como apoio na resolução de questões de ordem prático-funcionais relacionadas a otimização energética dos projetos.

³ *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* constitui um "primeiro esquema de certificação ambiental para edifícios, cujo objetivo passa por atenuar as consequências dos edifícios nos ambientes locais e globais, promovendo o bem-estar nos espaços interiores... utilizada em vários países europeus, como Alemanha, Holanda, Suécia, Espanha, entre outros" (<https://edificioseenergia.pt/>).

⁴ *Leadership in Energy and Environmental Design*, em tradução livre Liderança em Energia e Design Ambiental, é uma certificação americana, atualmente o sistema de classificação de edifícios verdes mais utilizado mundialmente. (<https://www.usgbc.org/leed>).

1.3 Metodologia

Visando atingir os objetivos propostos, foi definida uma metodologia de estudo com base nos seguintes pontos:

- Contextualização com literatura existente e exemplos de obras construídas;
- Formação de reforço em *Grasshopper* através de cursos disponíveis em plataformas de aprendizagem online;
- Desenvolvimento do *script* da fachada paramétrica;
- Análise e comparação dos resultados obtidos com a fachada desenvolvida e outras alternativas, nomeadamente uma fachada sem elementos de proteção solar e uma terceira fachada com elementos de medidas similares aos sistemas de sombreamentos estandardizados disponíveis no mercado, para averiguação de sua pertinência.

Capítulo 2 – Contextualização Teórica

Enquanto na matemática uma função paramétrica identifica um conjunto de quantidades que compõe uma função explícita de um número de parâmetros independentes, na arquitetura o termo paramétrico é frequentemente acompanhado pela exploração das possibilidades formais do projeto.

Este processo é facilitado tanto pela modificação dos parâmetros quanto pela modificação das relações entre eles. Atualmente, a modelagem paramétrica não é mais do domínio exclusivo de ferramentas abertamente paramétricas (como, por exemplo, CATIA⁵). Em vez disso, as equações paramétricas estão presentes em muitas ferramentas utilizadas cotidianamente, como os softwares da família BIM⁶ (*Building Information Modeling*), fazendo com que a modelagem paramétrica esteja presente de alguma forma na maioria dos projetos de arquitetura contemporânea. A rápida expansão de sua utilização somada a práticas de exploração formalista das ferramentas, tem feito com que apesar do grande enfoque que o tema recebe, ainda hoje não haja uma clara definição sobre o que o termo significa na arquitetura.

Em 2008, o arquiteto Patrik Schumacher cunhou o termo "parametrismo" na Bienal de Veneza, reforçado mais tarde com seu artigo "*Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design*" na revista *Architectural Design* onde, em meio a outras características que definiu, incluía uma estética bastante específica ao indicar que todas as formas devem ser suaves e que repetições simples e formas rígidas deveriam ser evitadas⁷.

No entanto, a arquitetura paramétrica é caracterizada sem a necessidade de se definir regras formais ou a criação de um estilo. Pode ser definida como um processo com base no pensamento algorítmico que possibilita a expressão de parâmetros e regras que juntos codificam, definem e elucidam a ligação entre a intenção inicial do projeto e sua resposta a isso (Frazer, 2016).

De acordo com Florio (2009), a modelagem paramétrica pode ser definida como a junção de milhares de partes individuais de uma edificação e suas conexões, em componentes que representam parâmetros para facilitar sua manipulação de acordo com as necessidades do utilizador. Assim, é possível testar diferentes composições sem começar do zero, alterando os parâmetros para obter resultados diferentes para comparação. As relações entre elementos e hierarquia são codificadas pelo próprio arquiteto, fazendo do projeto o resultado de um conjunto de condições pré-definidas que criam a forma final.

Sendo esse resultado, grosso modo, o produto final de um processo projetual onde parâmetros e/ou ferramentas paramétricas foram aplicadas na concepção de um elemento, seja ele um componente do projeto ou o todo, não exigindo a obrigatoriedade

⁵ CATIA, sigla para *Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application*, foi um dos primeiros softwares 3D, utilizado especialmente na indústria automobilística, aeronáutica e equipamentos industriais, utilizado no desenvolvimento do projeto do museu *Guggenheim* em Bilbao.

⁶ Em português, Modelagem de Informação da Construção, "consiste na representação digital e tridimensional das características físicas e funcionais de um edifício, contendo todas as informações necessárias para a execução, implantação, manutenção e gerenciamento de um projeto de forma integrada e organizada." (<https://certi.org.br/blog/bim/>).

⁷ Disponível em: <https://www.patrikschumacher.com/>.

da criação de geometrias complexas/e ou fluidas, apesar de sua exploração se tornar possível através do método.

Sobre os programas paramétricos, de acordo com o site da empresa Autodesk, (responsável por software de design digital mundialmente difundidos como AutoCad e Revit), o Grasshopper da Robert McNeel & Associates, o Generative Components da Bentley Systems e o Dynamo da Revit Autodesk são atualmente as três principais ferramentas paramétricas utilizadas. Estas possuem interfaces de *script* visual com base em gráficos que mapeiam o fluxo de relações de parâmetros por meio de funções definidas pelo usuário, geralmente resultando na geração de geometria. Assim, facilitam a sua utilização por designers, ao permitirem o manuseio de código através de diagramas visuais ao invés de texto, presente na programação convencional.

2.1 Origem do termo

Na arquitetura, a origem do termo paramétrico não é clara. O que se sabe é que a palavra paramétrica, tem origem na matemática. Entre as explicações dominantes, está a que tenha sido usado pela primeira vez associado ao design pelo arquiteto Luigi Moretti. (Bucci e Mulazzani, 2000).

Moretti identificava a arquitetura paramétrica como um estudo dos sistemas arquitetônicos em que as relações entre as dimensões seriam dependentes de vários parâmetros. Para exemplificar, o arquiteto usou o design de um estádio e indicou que a sua forma final teria sido derivada de dezanove parâmetros que incorporavam questões como ângulos de vista e o custo do betão. O projeto foi exibido na Trienal de Milão XII in 1960 (Bucci e Mulazzani, 2000).

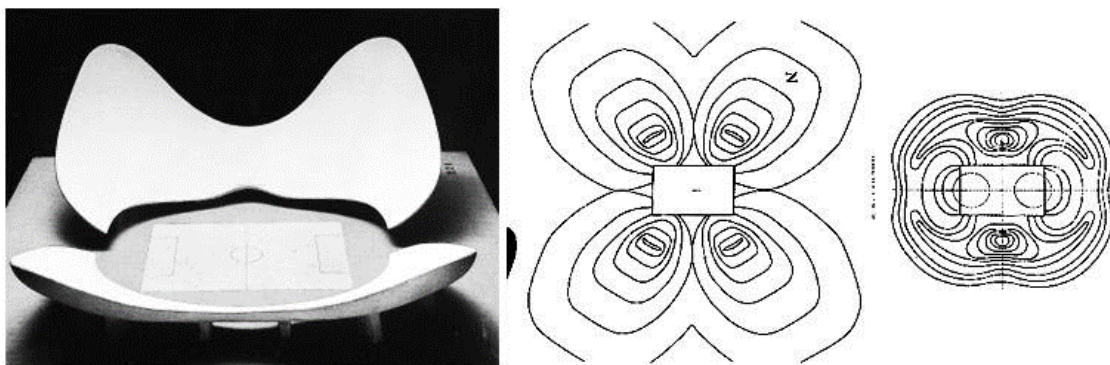


Figura 1 - Estádio de Moretti, maquete e desenhos - (Bucci & Mulazzani, 2002, p. 114)

Após sua investigação com o estádio em 1960, Moretti foi também autor do primeiro projeto que fez uso significativo de computadores, o Watergate Complex, em Washington, Estados Unidos, elaborado e construído entre os anos de 1962 e 1970.

Desde a sua popularização nos anos 70, as ferramentas CAD representaram uma grande revolução na forma de projetar - surgiram diferentes softwares de modelação bidimensionais e tridimensionais. Com o passar tempo esses softwares aperfeiçoaram-se,

com a implementação de uma linguagem algorítmica que possibilita simular, explorar e experimentar através de princípios, regras, métodos e teorias (Terzidis, 2009 apud Camargo, 2020).

Mas ainda muito antes do termo ser cunhado e a sua relação com o computador ser estabelecida, de acordo com GODOI (2018), Leon Battista Alberti já demonstrava que o pensamento algorítmico, paramétrico e generativo já estava presente na rotina dos arquitetos da altura, não sendo, portanto, algo ligado à presença dos computadores. Esta constatação é importante porque desconstrói a afirmação de que os sistemas generativos seriam resultantes da automação do processo de projeto propiciado por desenvolvimentos tecnológicos recentes. Pelo contrário, teriam tido o seu uso intensificado dada a enorme capacidade de processamento das máquinas contemporâneas.

O arquiteto Antoni Gaudí também projetava com base em equações paramétricas para definir as geometrias dos seus projetos. Acredita-se que esta prática teve origem na formação do arquiteto, que incluía cadeiras de matemática e física avançada, inspirando-o a produzir formas que eram regidas pela matemática (Català, 2007) tais como helicoides, parábolas e hipérbolas, associadas com razões booleanas e arcos catenários. A sua utilização era exemplificada com o uso de maquetes de correntes penduradas, onde cabos flexíveis produziam um arco rígido, que quando invertido se mantinha apenas por compressão natural, dando origem à catenária (Burry e Burry, 2010).

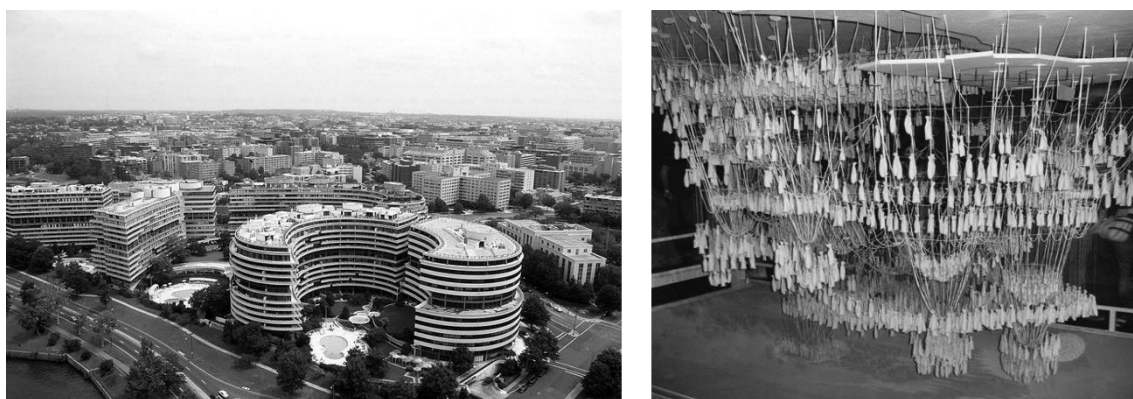


Figura 2 - O Complexo Watergate de Moretti(esquerda) e a maquete com pesos suspensos de Gaudí (direita). Créditos: Joe Rodota, autor desconhecido

A inovação para a altura foi que, como pode ser observado na figura 2, ao utilizar-se da força da gravidade em suas maquetes invertidas, a forma era automaticamente calculada mesmo se os parâmetros fossem alterados sem a necessidade de cálculos manuais, sendo alguns dos parâmetros o comprimento dos cabos e os pesos conectados a eles.

Em síntese, e baseado nos autores referidos acima, é correto afirmar que, o design paramétrico não é uma abordagem recente nem é fruto do avanço da tecnologia. Esta apenas facilitou a sua aplicação uma vez que, no ambiente computacional é possível trabalhar com um número maior de parâmetros para analisar, calcular e otimizar objetivos específicos. Nesse sentido, o design paramétrico pode até ser visto como um retorno às práticas antigas.

Os objetivos específicos e o foco do design paramétrico podem passar pela a forma, mas esta não a regra, já que a definição do design paramétrico passa pelo manuseio de parâmetros e sua correlação no processo de composição do design arquitetônico como forma de orientação para uma problemática específica ou várias, como exemplificado nos dezanove parâmetros do estádio de Moretti, sem nunca definir um estilo formal específico, sendo uma escolha do arquiteto a opção de trabalhar com formas fluidas ou não.

Após o Watergate Complex, projeto em que Moretti utilizou ferramentas digitais mantendo uma linguagem corrente, o arquiteto Frank Gehry projetou em 1992, com auxílio do software CATIA, a estátua do Goldenfish para as Olimpíadas em Barcelona e em 1997 o Museu Guggenheim em Bilbao. A linguagem orgânica e desconstrutivista dos dois projetos começava a indicar a implementação das ferramentas digitais para a elaboração

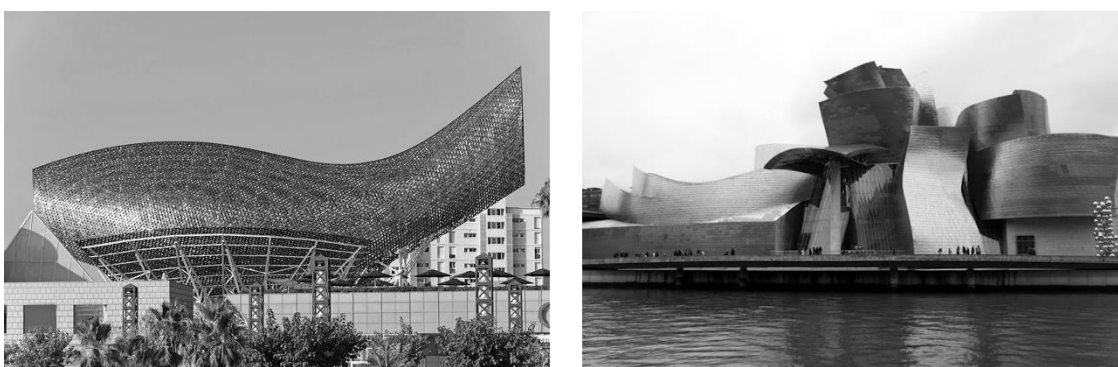


Figura 3 - A escultura do Goldenfish em Barcelona (esquerda) e o Museu Guggenheim de Bilbao (direita) Créditos: Zoonar/Vladyslav Danilin e RonG8888 (Flickr User)

de geometrias complexas e exploração da forma, não ortogonal, além de apontar para uma alteração no modo não somente de representar arquitetura, mas no seu processo de elaboração, o percurso para encontrar a forma.

Outros projetos precursores na utilização das ferramentas digitais e exploração da forma são a Bibliotheque de L'ihuel, de 1997, e o Bruges Concert Hall, de 1999, projetado pelo arquiteto Peter Eisenman, o BMW Central Building, de Zaha Hadid construído em 2005, as VM Houses também de 2005 desenhadas pelo arquiteto Bjark Ingels em Copenhague e o Hungerburg Station de 2007 projectado por Zaha Hadid. 2.2 Design Generativo

O Design Generativo é uma tecnologia que copia a abordagem evolutiva da natureza. Começa com os seus objetivos de design e em seguida explora todas as possíveis permutações de uma solução para encontrar a melhor opção. Usando o computador e um software de design generativo consegue-se obter, rapidamente, milhares ou até milhões de opções de design, testando configurações e aprendendo com cada interação o que funciona e o que não funciona. Este processo permite gerar novas opções, que um ser humano sozinho não poderia criar, na procura de chegar a um design mais eficaz (Camargo, 2020).

Embora o design generativo não se restrinja à aplicação de determinados tipos de ferramentas, os computadores e as ferramentas paramétricas mostram-se bastante eficientes na sua exploração pelo seu potencial em realizar cálculos matemáticos, os algoritmos, além de garantirem uma automação eficiente e orientada para a fabricação digital.

Algoritmos genéticos, por sua vez, são inspirados na teoria evolucionista de Darwin e apresentam como principais características a reprodução com herança genética, a variação aleatória numa população de indivíduos e a aplicação de seleção natural para “gerar as próximas gerações”. Esses métodos foram desenvolvidos por cientistas da computação nas décadas de 1950 e 1960, originando a área de pesquisa denominada Computação Evolutiva (Celani e Martino, 2012).

Este nome deve-se a serem inspirados na evolução biológica e sua base genética molecular. Esses algoritmos modificam um conjunto de dados de forma semelhante a populações de indivíduos, submetendo-os a ações seletivas como a evolução biológica (mutações e recombinação genética) e evolução de acordo com um critério específico, onde apenas os indivíduos mais capazes são sobreviventes, enquanto os demais são rejeitados (Lagos, 2012).

De acordo com os autores citados, Design Generativo é a aplicação de mecanismos genéticos inerentes ao processo evolutivo da natureza, como recurso na concepção do design, onde, através da utilização de um sistema generativo, várias novas versões são geradas.

Como indica Lagos, a aplicação dos algoritmos evolutivos pode ser útil não somente quando o que se pretende é a elaboração de múltiplas opções de design, mas também na existência de um objetivo específico que se pretende atingir. Desta forma, assim como na natureza, a recombinação das características dos modelos e a geração de novas versões é feita considerando a seleção natural, onde apenas os elementos que melhor atendam ao objetivo proposto serão mantidos.

São vastas as possibilidades de aplicação dos algoritmos evolutivos com orientação para um objetivo específico. Um exemplo disto mesmo é a otimização topológica, uma combinação entre engenharia, computação e design, onde as estruturas são “esculpidas” pelo algoritmo através de sucessivas reduções dos volumes desnecessários, ganhando formas que otimizam as relações físicas da forma. (Celani e Martino, 2012)

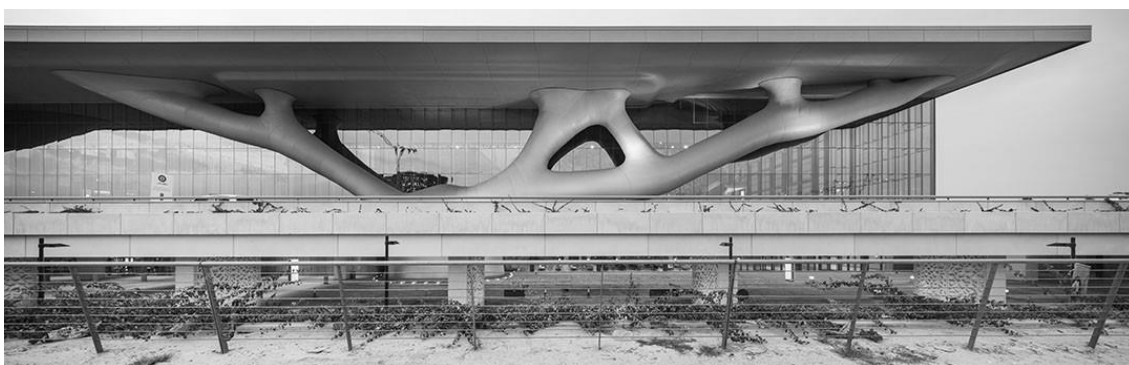


Figura 4 - Centro Nacional de Convenções do Catar. Créditos: Nelson Garrido

A Figura 4 apresenta o Centro Nacional de Convenções do Catar, projetado pelo arquiteto Arata Isozaki em 2011, onde a estrutura que suporta a cobertura, de contornos orgânicos e remetendo a uma árvore de Sidra, símbolo do país, foi otimizada através da utilização de algoritmos genéticos.

Outro exemplo da aplicação dos algoritmos genéticos é na otimização de plantas arquitetônicas, como no projeto de investigação de Joel Simon, *Evolving Floor Plans*⁸, “onde as áreas e o fluxo de utilizadores são dados ao algoritmo genético para otimizar o layout das plantas, com o intuito de reduzir o tempo de caminhada, uso de corredores, entre outros” melhorando assim as zonas de distribuição do projeto.

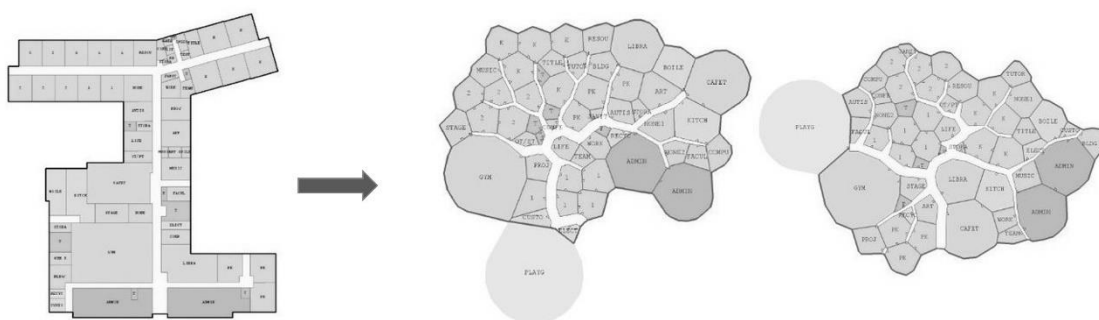


Figura 5 - Evolving Floor Plans: Planta de uma escola reorganizada conforme otimização das zonas de distribuição. Créditos: Joel Simon

Os algoritmos genéticos também podem ser pertinentes para dar resposta a questões de natureza sustentável/energética, como será exemplificado no caso de estudo que será apresentado a seguir, a Fábrica de CoBLOGó.

O exercício que será realizado e descrito no Capítulo IV, utilizará algoritmos genéticos como forma de encontrar a melhor combinação entre quantidade, tamanho, posicionamento e extrusão de aberturas presentes numa fachada, tendo como objetivo a maximização da receção de luz dentro do intervalo do índice UDI.

2.3 Caso de estudo: Fábrica de CoBLOGó / SUBDV

O caso de estudo abordado é um projeto desenvolvido pelo escritório SUBDV, dos arquitetos Anne Save de Beaurecueil e Franklin Lee. A obra foi escolhida por seu potencial pedagógico no que toca à inserção das ferramentas paramétricas na construção atual, uma vez que une ferramentas digitais e meios de construção atuais, para além de um certo regionalismo, expresso no elemento local que utilizam como inspiração, o cobogó.

⁸ Informações obtidas no website oficial do investigador: www.joelsimon.net, acesso em 04/07/2022

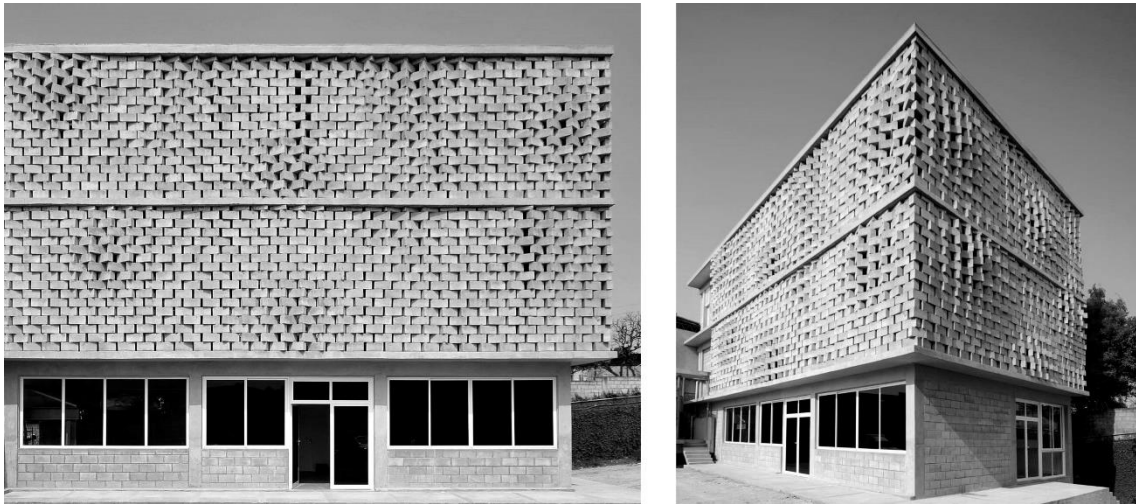


Figura 6- Fachada do edifício CoBLOGó – SUBDV. Créditos; Rodrigo Chust

A Fábrica de CoBLOGó foi construída em 2014 e está localizada na cidade de Taboão da Serra, no estado de São Paulo. Trata-se de uma ampliação das dependências de uma fábrica de cobogós, motivada pela melhoria das acomodações das zonas administrativas e criação de um novo espaço para exibição dos produtos que ali são fabricados. A sua estrutura é convencional, composta por betão armado.

A fachada é o elemento paramétrico do projeto, desenhada através da utilização de ferramentas paramétricas na composição e fabricação digital, entre eles *Rhinoceros*, *Grasshopper*, *Geco* e *Galápagos*, com o objetivo de otimizar o desempenho energético do edifício. Foi o primeiro edifício brasileiro onde este tipo de tecnologia foi aplicado e como foi já referido, o seu design faz referência ao tradicional elemento de sombreamento brasileiro, o cobogó.

O sistema da fachada é composto por duas peles onde a primeira é constituída por blocos de betão pré-fabricados, tendo sido este material escolhido pelo seu baixo custo e alta disponibilidade, e a segunda, a cinquenta centímetros da primeira, caixilhos em vidro, responsáveis pelo isolamento acústico. A fachada filtra a luz e também atua na ventilação do espaço, uma vez que tem suas aberturas orientadas à direção dos ventos na zona, resultando em um ambiente naturalmente iluminado e fresco.



Figura 7 - Interior do edifício e corte pela fachada. Créditos: Rodrigo Chust e escritório SUBDV

"A computação paramétrica foi usada tanto para gerar configurações geométricas, bem como para construir a fachada em si. Os *scripts* paramétricos geraram uma gradação sutil de rotação dos blocos, controlados por suas distâncias dos "pontos de atração". Aberturas de diferentes tamanhos e ângulos foram criados e testados utilizando simulação ambiental digital para obter a melhor combinação de sombreamento e iluminância" (Sperling *et al*, 2015)

Ou seja, apesar do efeito estético produzido, a composição da fachada é guiada por razões funcionais, onde a aplicação paramétrica utilizada para gerar a posição de cada bloco de betão da fachada teve como objetivo a otimização da geometria dos elementos que compõe a proteção solar, resultante de levantamentos sobre o sombreamento, exposição solar e direção dos ventos na zona.

O resultado é um maior controle térmico dentro do edifício através da otimização da ventilação e iluminação natural, afetando positivamente o consumo energético, diminuindo a necessidade de utilização de ar condicionado e iluminação artificial, além de contribuir para a ornamentação, que, nas palavras dos autores, "ilustra o conceito de ornamentação ambiental, onde o ornamento não é mais percebido como mera decoração, mas torna-se útil na produção de um desempenho ambiental específico, criando um novo tipo de estética funcional." (Sperling *et al*, 2015)



Figura 8 - Montagem da fachada com apoio de guias de papelão. Créditos; Rodrigo Chust

Além das ferramentas paramétricas, neste projeto os arquitetos aplicaram também o conceito *High-Low*, presente nas investigações do escritório através dos *workshops* pela *Architectural Association Visiting School*. Este processo tem como fundamento a união entre o conhecimento de arquitetos e engenheiros na utilização das ferramentas digitais com materiais de baixo custo e tecnologia e de fácil acesso enquanto garante a sua execução por mão de obra não especializada, adaptando-se à realidade da construção atual. Desta forma, para a montagem desta fachada, foram geradas guias de papelão projetadas parametricamente que, apoiadas numa 'estante', indicavam a correta posição onde cada um dos blocos de betão deveria ser assentado.

Capítulo 3 – Conceitos

3.1 A importância da iluminação no projeto

“Em todo projeto em que há preocupações com a sustentabilidade, é importante, desde os primeiros momentos, buscar soluções que contribuam passivamente para a melhora no desempenho do edifício. Fatores como ganho térmico solar, insolação, ventilação entre outros, podem ter seu desempenho melhorado pelas primeiras decisões de projeto. Dentre esses, o ganho térmico solar se destaca, pois é dado, basicamente, pela geometria, implantação e orientação do edifício. Os materiais construtivos e as cores utilizadas também fazem parte do cálculo do ganho térmico; contudo, tais fatores podem ser alterados em etapas posteriores do projeto sem grandes impactos. O ganho térmico está diretamente conectado aos gastos com condicionamento de ar do edifício durante seu período de funcionamento, que pode durar décadas. Logo, um bom projeto pode economizar grandes quantidades de energia e, conseqüentemente, dinheiro” (Campos, 2018).

Em concordância com Campos (2018) citado acima, é possível ainda acrescentar que além do grande tema da sustentabilidade, garantir a otimização da iluminação de um edifício, de forma a utilizar-se a maior quantidade de luz natural possível, é importante não somente para diminuir custos com eletricidade, ao evitar-se iluminação artificial desnecessária e a poluição eletromagnética dentro do edifício, mas também de modo a promover maior conforto aos utilizadores⁹.

A importância da luz natural num projeto é inclusivamente indicada em sistemas de creditação para certificação de edifícios sustentáveis, onde o objetivo é atribuir ao projeto, desde o momento inicial da sua elaboração, soluções projetuais orientadas para a sustentabilidade e o conforto dos seus utilizadores, refletindo-se numa arquitetura sensível às problemáticas climáticas e com um foco no utilizador final. Como exemplo, pode-se citar o sistema de certificação de edifícios sustentáveis LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), onde os projetos são avaliados com base numa tabela de créditos somados e a certificação acontece a partir da obtenção de um valor específico de créditos. A componente da iluminação está presente, podendo garantir até três valores dos 40 mínimos necessários.

Para a otimização da iluminação de um projeto, antes do uso de qualquer ferramenta, a escolha da orientação solar deve considerar as especificações climáticas e de exposição solar de cada país. Devido a sua posição no hemisfério norte, em Portugal, a orientação a sul é a que permite maiores ganhos solares, em oposição à orientação norte que apresenta uma iluminação neutra pela ausência de incidência solar direta.

É importante analisar não somente as características climáticas do país, mas também da região em questão. No caso deste trabalho, são consideradas as

⁹ A luz natural auxilia na regulação dos processos metabólicos do corpo humano, incluindo a produção de hormônios como a serotonina e contribuindo para a prevenção de doenças como diabetes 2 e as cardiovasculares, além de auxiliar na manutenção da saúde dos ossos.

Fonte: Zanuy, M. V., & Carranzab, F. H. (2007). Metabolismo, fuentes endógenas y exógenas de vitamina D. *Revista Española de Enfermedades Metabólicas Óseas*, pp. 63-70.

características climáticas da cidade do Porto, localizada no norte de Portugal. Por apresentar um clima mais ameno, a entrada dos raios solares é desejável, podendo, porém, requerer algum controle para evitar sobreaquecimentos, através de elementos protetores adicionados à fachada, como será feito neste exercício.

O programa da Unidade Curricular de Projeto V, que aqui iremos utilizar, é um centro desportivo dedicado à prática do remo, com tanques de treino no seu interior. Esta zona, com uma área total de 500 m², estará posicionada junto à fachada sul e será o espaço trabalhado neste exercício.

O terreno utilizado para o exercício está naturalmente posicionado a sul, numa frente fluvial do Rio Douro, de forma que, se fundamenta a escolha desta orientação para o exercício pelo seu posicionamento natural às orientações básicas de implantação para a região norte do país, garantindo assim uma maior eficiência energética e uma autonomia de iluminação natural.

3.1.1 Índice dinâmico UDI

De forma a se aferir a entrada e distribuição de luz natural e suas oscilações consoante aos testes que serão feitos para a fachada, serão utilizadas a medida dinâmica *Usefull Daylight Illuminances* (UDI). Estes valores são baseados em condições realísticas da variação de céu e insolação ao longo do tempo, fornecendo resultados para cada hora do ano em cada ponto considerado no ambiente (Nabil e Mardaljevic, 2006).

Segundo os autores, UDI, em tradução livre, Iluminância Útil da Luz Natural, é uma inovação na forma de se aferir a entrada e distribuição da luz no interior dos edifícios, diferente do Daylight Factor (DF)¹⁰ e Daylight Autonomy (DA)¹¹ que abordam apenas a autonomia da luz natural. O índice UDI baseia-se, em primeiro lugar, no conforto térmico dos seus utilizadores e, em consequência, também pode ter impacto sobre a vertente energética, indicando um intervalo entre 100lux a 2000lux onde este objetivo é alcançado, calculando desta forma não somente um mínimo luminoso pertinente para a manutenção do bem-estar dos utilizadores, mas também determinando um teto máximo de forma a se evitar o stress térmico que o excesso de luz pode causar.

Em resumo, de acordo com Nabil e Mardaljevic (2006), os valores de UDI estão baseados em três pilares: um intervalo entre 100lux e 2000lux, a diminuição do valor

¹⁰ "O conceito de Daylight Factor (DF) foi desenvolvido no Reino Unido no início do século 20. O fator de luz do dia é uma proporção que representa a quantidade de iluminação disponível em ambientes internos em relação à iluminação presente em ambientes externos ao mesmo tempo sob céu nublado. O fator de luz do dia é normalmente calculado dividindo a iluminação horizontal do plano de trabalho interno pela iluminação horizontal no telhado do edifício que está sendo testado e, em seguida, multiplicando por 100". (Informações obtidas em <https://patternguide.advancedbuildings.net/> Acesso em 04/03/2022.)

¹¹ *Daylight Autonomy*, em tradução livre, Autonomia de Iluminação Natural, mede a quantidade de horas de luz natural por ano que cada ponto de uma grelha projetada sobre o piso do compartimento recebe acima de um valor mínimo de iluminância estabelecido, que pode variar entre 300lux a 500lux. No entanto, os valores de incidência solar excessivos são desconsiderados, o que pode resultar em uma análise que favoreça a autonomia luminosa através da iluminação natural e redução de iluminação artificial, porém podendo não ser eficiente na manutenção do conforto térmico e bem-estar dos ocupantes. (Nabil e Mardaljevic, 2006)

mínimo que passa de 500lux para 100lux, e a consideração dos valores excedentes como não desejáveis e por isso não incluídos nos seus resultados de distribuição de luz.

3.2 Diagrama de Voronoi

O Diagrama de Voronoi é um sistema de auto-organização de estruturas biológicas (Nowak, 2015) presente na natureza em diversas formas, dentre elas, a pelagem de animais, asas de insetos, carcaça de tartarugas e escamas de répteis, padrões minerais, entre outros. Igualmente chamado *Polígono de Thiessen* ou *Tesselação de Delaunay*, é empregue nas áreas de arqueologia, biologia, cartografia, mineralogia, meteorologia, fisiologia, estatística e, mais recentemente, em planejamento urbano e regional (Boots et al, 1995 apud Rezende et al, 2000)

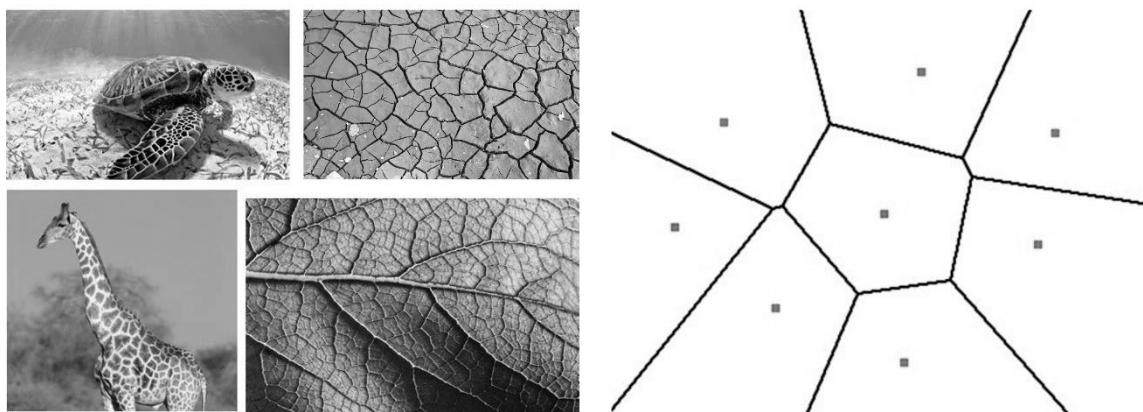


Figura 9 - Padrão Voronoi presente na natureza. Créditos: Autor desconhecido

Matematicamente, a construção do Diagrama de Voronoi ocorre primeiramente ao tomar-se em conta um conjunto de pontos não colineares, $P = \{p_1, p_2, p_n\}$, $n > 2$, no plano Euclidiano, denominados "pontos geradores". Entre esses pontos, são traçadas retas equidistantes entre si, que irão formar as bordas dos polígonos. Cada polígono, fechado e adjacente a outro, contendo apenas um dos pontos geradores, é denominado Diagrama de Voronoi (Boot et al, 1995 Apud Rezende *et al.*, 2000).

Em suma, trata-se de um sistema que divide o espaço em subespaços de forma orgânica e que utiliza pontos dispostos sobre um plano para a sua delimitação, tendo como regra o fato de que, dentro de qualquer um destes subespaços ou células, qualquer ponto a posicionar estará sempre mais próximo do núcleo desta célula do que de qualquer outro no plano.

Seja na arquitetura ou no design, é comum o uso da natureza como inspiração no processo criativo, sendo as características estéticas e sistemas estruturais biológicos explorados na tentativa de obter uma aparência mais orgânica sem ter de, para isso, replicar diretamente elementos naturais. Na arquitetura, por se tratar de um padrão que oferece muitas vantagens permitindo a codificação de pontos e coordenadas obtidas do espaço ou parâmetros, o diagrama de Voronoi tem sido implementado como uma ferramenta de projeto paramétrico, especialmente explorado na obtenção de estruturas orgânica e padrões naturais em projetos de fachada (Sahin e Sahin, 2017).

A figura 10 apresenta os exemplos das fachadas do edifício sede da empresa de *e-commerce* Alibaba na cidade chinesa Hangzhou, desenvolvida pelo escritório Hassell, e da Galeria Warminska, um centro comercial em Olsztyn, Polónia, pelo escritório Kuryłowicz & Associates.



Figura 10 - Fachadas da empresa Alibaba, em Hangzhou, (esquerda) e da Galeria Warminska, em Olsztyn (direita).
Créditos: Peter Bennetts e Kuryłowicz & Associates

No que se refere ao planeamento urbano e regional, o diagrama de Voronoi também pode ter o seu uso aplicado, sendo útil especialmente em análises espaciais onde questões relacionadas com a proximidade e abrangência são relevantes, como na implantação de equipamentos públicos de uso coletivo, de forma a garantir o correto acesso da população a um serviço. A sua utilização pode ser feita através de programas de geoprocessamento como o QGIS.

O padrão Voronoi pode ser utilizado em 2D, como será aplicado neste trabalho, mas também em 3D, especialmente quando o seu uso é estrutural.

Capítulo 4 – Exercício Prático

A elaboração deste exercício de apoio ao projeto recorreu a três ferramentas paramétricas. A primeira, o *plug-in* de programação visual *Grasshopper*, nativo do *Rhinoceros*, um *software* de modelagem tridimensional baseado na tecnologia NURBS¹² que, segundo Coutinho *et al.* (2012), consiste num editor gráfico de algoritmos que possibilita a geração de um fluxo de informação necessário à geração de formas, aceitando, porém, outros *scripts*. O *Grasshopper* permite criar algoritmos intuitivamente, onde a informação é modelada através da ligação de parâmetros, que contêm informação e componentes que agem sobre esta. Para a importação e manuseio das informações e análises climáticas foi escolhido, o *plug-in* *Honeybee*.

A aplicação *Honeybee* integra o pacote de ferramentas *Ladybug Tools*, que por sua vez é “uma coleção de aplicações gratuitas que suportam design e educação ambiental”. Vinculado ao ambiente *Grasshopper/Rhinoceros*. É aplicável especificamente para a “modelagem detalhada de iluminação natural e termodinâmica na criação, execução e visualização de simulações”¹³

Como forma de testar a pertinência e aplicabilidade das ferramentas digitais como auxílio ao processo de tomada de decisão projetual no que toca à otimização da iluminação natural em detrimento ao uso de luz artificial, mas principalmente como forma de otimizar o conforto dos utilizadores, este exercício ocorrerá com a estrutura que se descreve de seguida.

Será concebida uma fachada com padrão Voronoi desenvolvida com ferramentas paramétricas e, a partir dos parâmetros aplicados e das condicionantes climatéricas da zona onde está inserido o projeto arquitetónico, a fachada será otimizada através da aplicação de algoritmo genético, com o componente Galápagos, nativa do *Grasshopper*, com o objetivo de encontrar a melhor alternativa de *layout* da fachada para maximizar a incidência lumínica no intervalo do índice UDI, compreendido entre 100lux e 2000lux.

Uma vez concluída, a fachada paramétrica será comparada com dois outros modelos: o primeiro composto por uma superfície envidraçada sem nenhum elemento de proteção solar e o segundo contendo elementos de medidas similares aos sistemas de sombreamento genéricos disponíveis no mercado. Deste modo, pretende-se conseguir analisar a eficiência da aplicação sugerida neste trabalho.

4.1 Elaboração da fachada paramétrica em *Grasshopper*

O exercício inicia-se pela exportação da volumetria do projeto utilizado para os testes e a contextualização de sua carta solar através das informações climatéricas que compõe a base de dados utilizada para esta análise, que em formato EPW (*EnergyPlus Weather*), contém informações meteorológicas recolhidas ao longo de anos em diferentes

¹² NURBS: Non-Uniform Rational B-Splines, em tradução livre B-Spline Racional não Uniforme: Curvas e superfícies criadas especificamente para modelo 3D usando computador, são construídas matematicamente e não existem no desenho tradicional. Informações obtidas em: <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/3ds-max/learn-explore>. Acesso em 20/07/2022

¹³ Informações obtidas em <https://www.ladybug.tools/honeybee>. Acesso em 20/07/2022

locais do mundo. Normalmente estes dados são fornecidos por instituições que possuem uma estação meteorológica de grande precisão, tais como aeroportos.

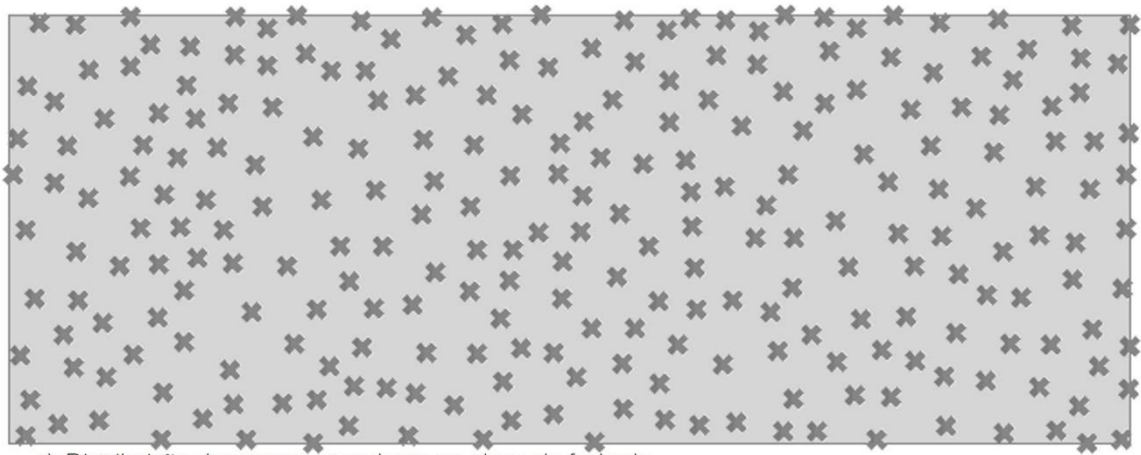
Neste trabalho, os dados meteorológicos utilizados são provenientes das aferições realizadas na estação meteorológica do Aeroporto Francisco Sá Carneiro e consideram o posicionamento geográfico e solar do terreno localizado junto à Rua do Ouro, número 151, Porto.



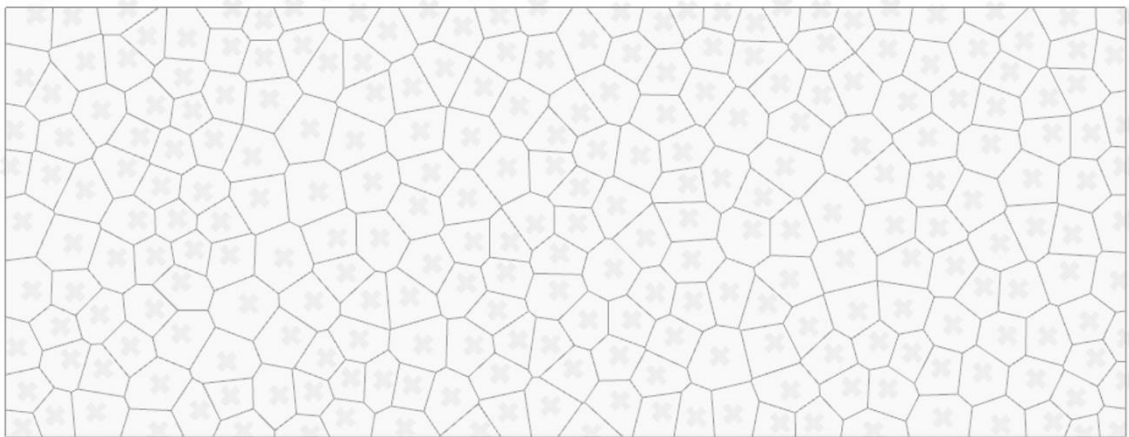
Figura 11 - Projeto arquitetónico e contexto envolvente (o volume que será utilizado para o exercício é representado a cinza-escuro). Créditos: Google Earth com edição da autora

A partir da superfície da fachada do projeto, é definido uma série de pontos geradores que serão o núcleo central de cada célula Voronoi (item a da figura 12). A quantidade de pontos está sujeita ao critério do arquiteto, ao considerar a quantidade de aberturas que pretende ter na sua fachada bem como a sua proporção. Após alguns testes, foi determinado um intervalo de valores entre 200 e 300 pontos, por estarem mais alinhados com as necessidades de iluminação e design almejados. A quantidade de pontos, que por sua vez será a quantidade de aberturas da fachada, é o primeiro parâmetro aplicado ao exercício.

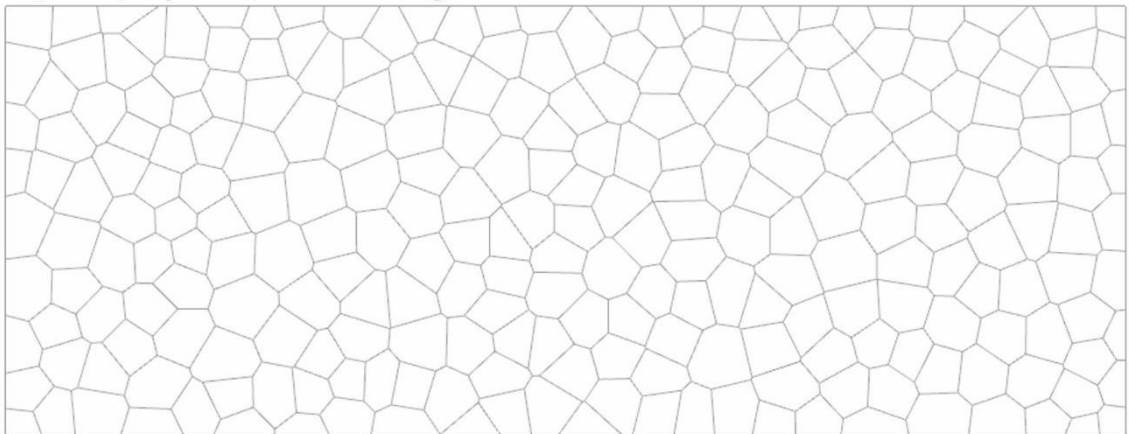
Para o posicionamento dos pontos, é utilizado o componente *Populate 2D*, que, de forma aleatória, os distribui sobre o plano da fachada para que posteriormente possam ser manuseados pelo algoritmo genético. O segundo parâmetro é uma *seed*, um número que variará entre 1 e 10 de forma a alterar a função que determina a aleatoriedade do posicionamento dos pontos no plano.



a) Distribuição dos pontos geradores no plano da fachada



b) Sobreposição dos pontos e células geradas



c) Células voronoi

Figura 12 - Pontos geradores e células Voronoi. Créditos: Autora

Nos espaços diretamente relacionados com esta fachada, no piso inferior, estão localizados os tanques de treino, possuindo, tipologicamente, uma maior necessidade de recepção de luz em detrimento da sala polivalente que ocupa o piso superior, gerando uma necessidade que não poderia ser corretamente atendida por uma solução que incluísse um único padrão de aberturas e/ou elementos de proteção solar comum a estas duas áreas.

Para suprir esta necessidade programática, controlando e personalizando a entrada de luz nos diferentes espaços, é proposta uma organização das células do plano através

de um gradiente dimensional, onde na altura do piso inferior as células serão maiores e na do piso superior serão menores.

Deste modo, o terceiro parâmetro é incorporado no código, através do remapeamento dos pontos numa orientação do eixo z (altura), escalando as células entre os fatores 1 e 10, dando maior tamanho às células presentes na parte inferior do plano da fachada, enquanto o extremo superior será marcado por células de menor tamanho, resultando num gradiente dimensional personalizado que melhor atenderá a distribuição de luz no interior dos diferentes espaços que estão junto à fachada do edifício.

Além das aberturas no plano da fachada, como forma de maior controle sobre a incidência lumínea no interior do edifício, é adicionado a cada uma das células criadas, uma extrusão das suas bordas para que atuem como elementos de sombreamento. As suas medidas variam entre 50mm a 250mm. Este é o quinto parâmetro aplicado.

Após a elaboração do *script* da fachada, é necessário criar o modelo *Honeybee* (HB). O modelo HB comunica ao *plug-in* qual é o volume a ser analisado, as superfícies envidraçadas e foscas, os elementos de sombreamento e a superfície que representará o chão dentro do compartimento, para que o *software* possa fazer o cálculo da incidência solar.

Uma vez configurado o modelo HB, é criada uma grelha de sensores no plano que constitui o piso do volume e através do componente *HB Annual Daylight* com o *input* de UDI máximo em 2000lux, o programa faz a análise da percentagem anual que cada um dos sensores presentes na grelha do piso recebe luz no intervalo lumíneo desejado. Para visualização dos resultados, é gerado um mapa de calor espacial com o componente *LB Spacial Heatmap*.

Depois da análise solar concluída, os cinco parâmetros referidos são conectados ao Galápagos e é selecionado o valor que se almeja otimizar, neste caso, o resultado do UDI gerado pelo componente *HB Annual Daylight* indicado acima. Assim o componente testará as combinações entre os cinco parâmetros e selecionará a opção que atinja o maior valor de UDI possível para aquela configuração.

No teste executado, o componente Galápagos examinou as combinações entre os parâmetros configurados e apresentou como melhor solução para otimização dos valores de UDI dentro do edifício um *layout* de fachada contendo duzentos e cinquenta e seis aberturas com dimensões que variam entre 157mm² e 955mm² (figura 13).

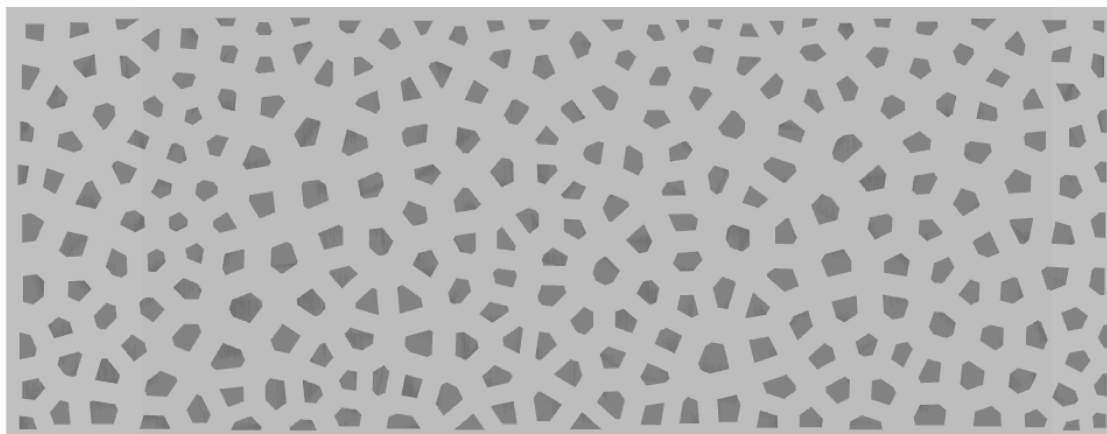


Figura 13 - Layout final da fachada paramétrica. Créditos: Autora

4.2 Comparação dos resultados obtidos

De forma a verificar a atuação da fachada desenvolvida no controle da entrada de luz no interior do edifício, esta foi comparada com duas outras fachadas de diferentes *layouts*: a primeira em vidro sem nenhum elemento de proteção solar, e a segunda contendo elementos semelhantes aos sistemas de sombreamento genéricos disponíveis no mercado.

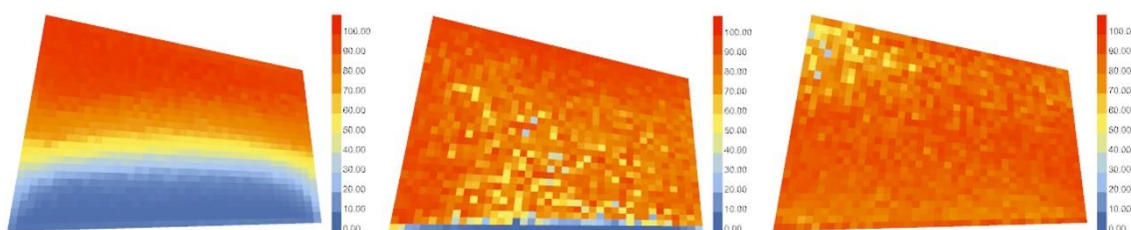


Figura 14 - Mapas de calor: Fachada sem proteção (esquerda), fachada com elementos de sombreamento genéricos (centro) e fachada paramétrica (direita). Créditos: Autora

Foi definido como referência para a fachada genérica um sistema de sombreamento da empresa espanhola Cortizo, por se tratar de um produto com ampla disseminação, uma vez que a marca está presente em pelo menos sessenta países, segundo informações em sua página oficial. O sistema escolhido é composto por lâminas tubulares de alumínio posicionadas horizontalmente e perpendicular ao plano da fachada em vidro, com elementos contendo 12mm de espessura, 60mm de comprimento e espaçamentos de 50mm.

Percentagem lumínea anual entre 100lux a 2000 lux (UDI)	Fachada sem proteção	Fachada genérica	Fachada paramétrica
De 0% a 20%	332	47	0
De 20% a 40%	109	24	4
De 40% a 60%	97	71	81
De 60% a 80%	199	461	270
De 80% a 100%	411	545	793
Total	1148	1148	1148

Tabela 1 - Comparação anual dos resultados por número de sensores e percentual de luz recebida. Créditos: Autora

Os mapas de calor da figura 14, a Tabela 1 e o Gráfico 1 comparam os resultados obtidos em cada um dos três modelos através da percentagem anual de luz que cada um dos 1148 sensores no piso do compartimento recebeu no intervalo entre 100lux a 2000lux (valores mínimo e máximo do índice dinâmico UDI). Valores não compreendidos neste intervalo não estão incluídos nos resultados indicados.

Como pode ser observado no Gráfico 1 a fachada sem proteção tem a pior performance, com 332 sensores que receberam a menor percentagem anual de luz. Esta

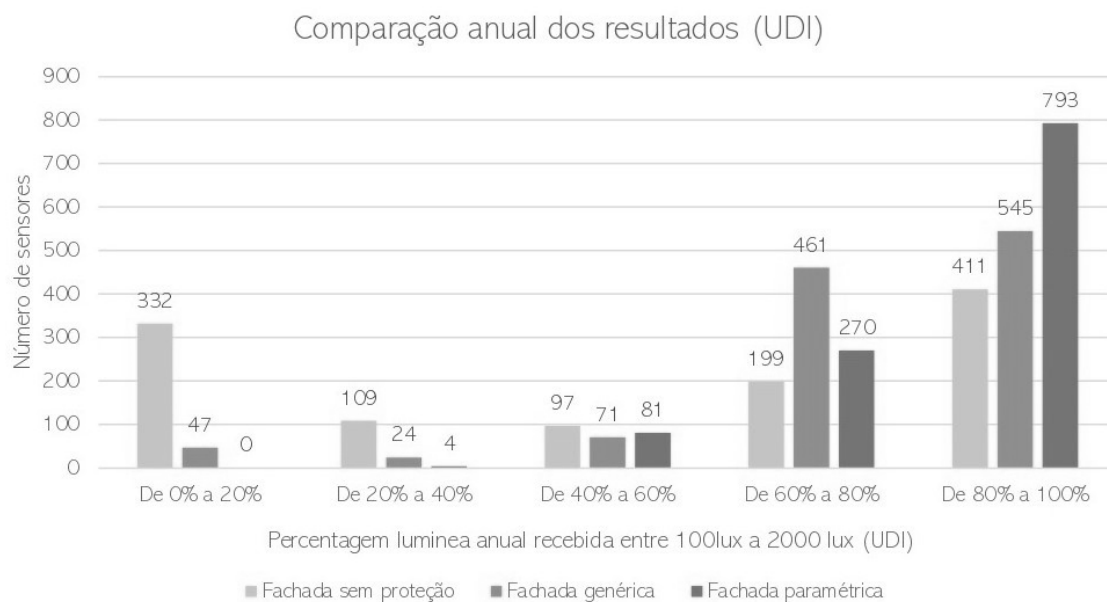


Gráfico 1 - Comparação anual dos resultados em percentagem de sensores dentro do intervalo de UDI. Créditos: Autora

fachada também tem a maior quantidade de sensores nos intervalos entre vinte e quarenta, e entre quarenta e sessenta por cento do ano, enquanto nos intervalos de maior percentagem, apresenta a menor quantia de sensores.

Apesar de possuir pelo menos quarenta e sete sensores com valores de recepção lumínica entre zero e vinte por cento do ano no intervalo lumínico compreendido entre 100lux e 2000lux, a fachada genérica apresentou uma atuação satisfatória, ao garantir valores reduzidos nos intervalos de menor percentagem, concentrando-se especialmente entre os intervalos de maior pertinência: sessenta a oitenta por cento e oitenta a cem por cento do ano recebendo a luz dentro do intervalo lumínico pretendido.

A fachada paramétrica desenvolvida neste exercício mostrou-se bastante eficiente, especialmente por não possuir nenhum sensor que tenha recebido luz apenas entre zero e vinte por cento do ano e, sobretudo, pela quantidade de sensores que receberam a luz no intervalo estipulado durante quase a totalidade de horas do ano.

No intervalo intermediário entre quarenta e sessenta por cento, a fachada paramétrica equipara-se às outras fachadas. No intervalo de sessenta a oitenta por cento a fachada paramétrica possui menos sensores do que a fachada genérica. No entanto, e como já mencionado, destacou-se principalmente no último intervalo, de recebimento de lumínico máximo, entre oitenta e cem por cento do ano, com 793 sensores - aproximadamente uma vez e meia a quantidade de sensores da fachada genérica.

Capítulo 5 – Conclusão

Esta dissertação teve como objetivo debater o potencial da abordagem e ferramentas paramétricas na resolução de questões de natureza prática e funcional da prática de arquitetura. Neste caso específico, colocou-se o enfoque na otimização lumínea de um edifício.

Acredita-se que o trabalho cumpriu o seu intuito através dos resultados atingidos do exercício prático, na atuação da abordagem paramétrica sobre a otimização lumínea e de bem-estar dos utilizadores, enquanto também contribui para a conceção de um design inovador, diferenciando-se das soluções de proteção solar estandardizadas - o que, nas palavras do arquiteto Franklin Lee, resulta em “um novo tipo de estética funcional”.

Apesar da eficiência da fachada genérica, a fachada paramétrica desenvolvida teve uma performance superior, o que, aliado à sua atuação, traz também como diferencial o seu design que contribui para a conceção arquitetónica do projeto.

O exercício teve como mote principal a elaboração de um elemento de pequeno porte, a fachada de um edifício, na tentativa de exemplificar de forma didática e explicativa, o potencial das ferramentas paramétricas. No entanto, a mesma lógica de composição pode ser aplicada também para contextos de maior escala, seja na organização da planta de um edifício, sua volumetria geral, ou até mesmo no planeamento urbano orientado para otimização energética.

É importante considerar que, não se pretende através deste estudo afirmar que as ferramentas paramétricas são a melhor opção para a arquitetura e que sendo assim, devem os meios mais ‘antigos’ de elaboração projetual ou até mesmo os existentes sistemas estandardizados de sombreamento serem substituídos por elas. Pelo contrário, o que se propõe é que as ferramentas paramétricas possam ser percebidas como um elemento que deve ser conhecido e explorado pelos arquitetos, para que confrontados com certas questões possam ter aqui uma ferramenta de apoio à decisão e ao desenho.

As tendências atuais apontam para um cenário onde brevemente, a escolha dos materiais, dos métodos construtivos e outras opções projetuais não se sustentarão apenas no gosto ou conforto unicamente de um cliente, tendo de responder a questões de natureza mais ampla, como a pegada ecológica da construção e autonomia energética. Os métodos correntes de projetar não irão desaparecer. No entanto, é possível que no futuro não sejam suficientes para atender às exigências da larga escala mundial.

A arquitetura do futuro não será obrigatoriamente composta por geometrias complexas, formas incomuns ou designs inovadores nunca vistos. Mas precisará de ser responsiva, prática, social, ecológica e alinhada às necessidades do mundo atual.

Bibliografia

- Abu-Dakka, M. G. (2009). *The Use of Useful Daylight Illuminance (UDI) to Test New Designs for Improving Daylight Performance of Office Buildings in Dubai-UAE*. Dubai: Faculty of Engineering - The British University in Dubai.
- Bucci, F., & Mulazzani, M. (2000). *Luigi Moretti: Opere e Scritti*. Milão: Electa.
- Burry, J., & Burry, M. (2010). *The New Mathematics of Architecture*. Londres: Thames & Hudson.
- Camargo, L. (2020). *Design Generativo e Impressão 3D de Grande Escala Aplicados à Indústria Portuguesa do Mobiliário*. Porto: Universidade do Porto.
- Campos, F. M. (2018). Projeto Performativo Baseado em Regras de Otimização Multicritério. Em G. Celani, & M. Sedrez, *Arquitetura Contemporânea e automação: Prática e Reflexão* (pp. 120-133). São Paulo: ProBooks.
- Cartana, R. P., & Pereira, F. O. (Outubro de 2016). Elementos de Controle Solar Desenvolvidos com Modelagem Paramétrica e Algoritmos Evolutivos. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção Vol. 7 No. 3*, pp. 133-144.
- Català, C. A. (2008). Gaudí, the Geometer. Em M. Burry, J. B. Armengol, J. Tomlow, & J. B. Nonell, *Gaudí Unseen: Completing the Sagrada Família* (pp. 81-85). Berlim: Jovis.
- Celani, G. (2013). *LAPAC 2006 - 2013: Laboratórios de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção*. Campinas: UNICAMP.
- Dorin, A. (2001). Aesthetic Fitness and Artificial Evolution for the Selection of Imagery From the Mythical Infinite Library. *European Conference on Artificial Life 2001* (pp. 659-668). República Checa: Springer.
- Fisher, T., & Herr, C. M. (2001). Teaching Generative Design. *4th Generative Art Conference 2001*. Milão: Proceedings of 4th Generative Art Conference.
- Florio, W. (2009). Modelagem Paramétrica no Processo de Projeto em Arquitetura. *Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído* (pp. 571-582). São Paulo: Anais do Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído.
- Frazer, J. (2016). Parametric Computation: History and Future. Em P. Schumacher, *AD Parametricism 2.0: rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century* (pp. 18-20). Londres: John Wiley & Sons.
- Frota, A. B. (2001). *Manual do Conforto Térmico*. São Paulo: Studio Nobel.
- Godoi, G., & Celani, G. (2012). Alberti Digital Estudo da Influência do Tratado Albertiano na Arquitetura Colonial Brasileira. *Sigradi 2012*. Fortaleza: Anais do Sigradi 2012.
- Heidari, A., & Sahebzadeh, S. (Fevereiro de 2018). Parametric Architecture in it's Second Phase of Evolution. *Journal of Building Performance Simulation Vol. 9 No. 1*.

- Lagos, P. S. (2012). Análisis paramétrico de volúmenes arquitectónicos con algoritmos genéticos. *Revista Hábitat Sustentable Vol. 2 No. 1*, pp. 47-58.
- Lee, K. S., Han, K. J., & Lee, J. W. (Novembro de 2016). Feasibility Study on Parametric Optimization of Daylighting in Building Shading Design. *Sustainability 8*, 1220.
- Locatelli, D., Paula, A. d., Omena, T. H., & Lara, A. (2018). High-Low as expression of the Brazilian digital fabrication. *XXII Congresso da Sociedade Iberoamericana de Gráfica Digital*. São Carlos: IAU USP.
- Mardaljevic, J. (2000). Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. *CIBSE Daylight Group/Society of Light and Lighting Conference on Daylight Design and Reserch* (pp. 111-118). Londres: Lighting Research & Technology Vol. 32 No. 3.
- Marques, I. C. (2015). *Abordagem Científica ao Projeto Numa Perspectiva Computacional da Arquitectura: A Hochschule fur Gestaltung-Ulm*. Lisboa: Faculdade de Arquitetura - Universidade de Lisboa.
- Martino, J. A., & Celani, G. (2012). O algoritmo evolutivo como método projetual. *Sigradi 2012*. Fortaleza: Anais do Sigradi 2012.
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (Março de 2005). Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology*.
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings 38*, pp. 905–913.
- Oliveira, L. C. (2008). *Otimização Estrutural Utilizando o Algoritmo Evolucionário do Enxame de Partículas*. Recife: Universidade Federal de Pernambuco.
- Omena, T. H. (2019). *Ciclo de Desenvolvimento de Projeto Baseado em Desempenho do Material: Dos processos Digitalmente Mediados à Fabricação Local*. São Paulo: FAUUSP.
- Oxman, R. (Maio de 2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies Vol. 27 No. 3*.
- Pazini, E. Z. (2018). *Arquitetura Paramétrica: Mensuração do Fenômeno de Engajamento no Processo de Projeto Contemporâneo*. Passo Fundo: Faculdade Meridional IMED.
- Pedro, A. L. (2016). *Sistemas Paramétricos de Modelação Visual por Nodes. Um estudo sobre as possibilidades Projetuais concedidas na Modelação*. Lisboa: Universidade de Lisboa.
- Schumacher, P. (2009). Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design. *Architectural Design Vol. 79 No. 4*, pp. 14–23.
- Souza, L. P. (2018). *Os Caminhos do Projeto na Plataforma Digital: Um investigação Pedagógica do Processo Projetual no Ambiente Paramétrico*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Sperling, D. M., & Polo, P. C. (2015). *HOMOFABER: Digital Fabrication in Latin America - CAAD Futures 2015 > The next city*. São Carlos: Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos.

Suzuki, E. (15 de 12 de 2020). *What Is Parametric Design in Architecture, and How Is It Shaping the Industry?* Obtido de Autodesk:
<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/parametric-design-architecture-shaping-industry/>

Terzidis, K. (2006). *Algorithmic Architecture*. Londres: Architectural Press.

Zanuy, M. V., & Carranzab, F. H. (04 de 07 de 2007). Metabolismo, fuentes endógenas y exógenas de vitamina D. *Revista Española de Enfermedades Metabólicas Óseas*, pp. 63-70.

Anexo A – Maquete digital



