

NATÁLIA DE QUEIROZ NOME

ARTEFATOS GERADORES DE MICROCLIMA:
biomimética, parametrização e prototipagem rápida na busca por soluções bioclimáticas para
clima quente e úmido

Recife
2015

Natália de Queiroz Nome
Arquiteta e Urbanista

ARTEFATOS GERADORES DE MICROCLIMA: BIOMIMÉTICA, PARAMETRIZAÇÃO E
PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA BUSCA POR SOLUÇÕES BIOCLIMÁTICAS PARA CLIMA
QUENTE E ÚMIDO

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Design, para obtenção do Título de Mestre em Design na linha de pesquisa de Design, Tecnologia e Cultura, para a Universidade Federal de Pernambuco.

Área de concentração: Planejamento e Contextualização de Artefatos

Orientador: Prof. Ney Dantas, Ph.D, Prof. do Departamento de Arquitetura e da Pós-Graduação em Design.

Recife,
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE

Centro de Artes e Comunicação

PPD - Pós-graduação em Design

Coordenador da pós-graduação em Design

Prof. Leonardo Castillo, Ph.D.

Vice Coordenador da pós-graduação em Design

Prof. Ney Dantas, Ph.D.

Catálogo na fonte

Bibliotecário Jonas Lucas Vieira, CRB4-1204

N799a	<p>Nome, Natália de Queiroz</p> <p>Artefatos geradores de microclima: biomimética, parametrização e prototipagem rápida na busca por soluções bioclimáticas para clima quente e úmido / Natália de Queiroz Nome. – Recife, 2015. 135 f.: il., fig.</p> <p>Orientador: Ney Brito Dantas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Artes e Comunicação. Design, 2017.</p> <p>Inclui referências e apêndice.</p> <p>1. Bioclimatologia. 2. Biomimética. 3. Parametrização. 4. Fabricação digital. 5. Ilha de calor. I. Dantas, Ney Brito (Orientador). II. Título.</p> <p>745.2 CDD (22. ed.)</p>	UFPE (CAC 2017-86)
-------	--	--------------------



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE

Natália de Queiroz Nome

*"Artefatos geradores de microclima: biomimética, parametrização e prototipagem
rápida na busca por soluções bioclimáticas para clima quente e úmido."*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: DESIGN E ERGONOMIA

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o(a) candidato(a) **Natália de Queiroz Nome** APROVADA.

Recife, 28 de agosto de 2015.

Prof. Ney Brito Dantas (UFPE)

Prof. Leonardo Augusto Gomez Castillo (UFPE)

Profª. Regiane Trevisan Pupo (UFSC)

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem a ajuda de múltiplas pessoas que contribuíram imensamente para execução das etapas previstas pela pesquisa. Uma pesquisa dificilmente tem mérito apenas do autor. Durante esta, existiu uma série de encontros valiosos que contribuíram na construção de ideias e execução das etapas de trabalho. São a esses encontros que dedico os agradecimentos.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao orientador do trabalho, o professor **Ney Dantas**, com o qual aprendi lições leves e incisivas, não apenas para a execução desta pesquisa, mas que também me acompanharão durante toda vida. Estendo esses agradecimentos aos colegas do Nexus-UFPE e ao professor **Leonardo Castillo**, que sempre faz colocações construtivas aos nossos trabalhos.

Gostaria de agradecer ao **Carlos Nome**, professor da arquitetura da UFPB e antes de tudo, também meu marido. Sem ele não seria possível à execução de diversas etapas do trabalho. Obrigada por acreditar nas ideias, por encoraja-las e também por contribuir durante a execução das etapas práticas. Além disso, obrigada pela paciência. Também estendo esses agradecimentos à equipe do Laboratório de Modelos e Protótipos (LM+P) da UFPB, que cedeu por diversas vezes espaço para execução das etapas de prototipagem.

Quero agradecer ao professor do Departamento de Expressão gráfica da UFPE, **Carlos Vaz**, pelas lições valiosas sobre modelagem com *scripting* gráfico. Sem as quais, este trabalho não teria sido executado. Além de tudo, são de grande valia para meus futuros trabalhos.

Agradeço a **Proquinor** (sede de Natal-RN) pela visita a fábrica, pela aula sobre a resina de mamona e pela cessão das amostras que foram utilizadas neste trabalho. Foram de grande valia.

Agradeço ao Laboratório de Maquetes da UFRN (Labmaq - UFRN), que em nome do professor **Fernando Costa**, cedeu o uso das máquinas de prototipagem rápida, as quais possibilitaram execução de uma etapa importante do trabalho. Também estendo os agradecimentos ao **Túlio Costa** que doou seu sábado trabalhando na universidade e realizando uma imensa ajuda na etapa de Prototipagem rápida. Também agradeço ao “**Sr. Mário**”, que acompanhou todo processo e nos ajudou aquele sábado.

Ao professor **Aluísio Braz** da UFPB que cedeu o uso nas instalações do Labeme-UFPB. E ao aluno **Pablo Lacerda** que nos acompanhou em todo processo dos testes executados no laboratório.

Agradeço a aluna **Julyana Farias** pelo auxílio na execução de alguns protótipos.

A professora **Regiane Pupo** da UFSC por ter enviado textos e referências valiosas para compreensão de algumas abordagens deste trabalho.

Ao Labcon-UFPB, que em nome da professora **Solange Leder**, cedeu a máquina com visor de infravermelho. A qual, colaborou com uma leitura didática de parte desta pesquisa.

A CAPES pela bolsa de estudo.

"Um ser humano é uma parte de um todo chamado por nós de universo, uma parte limitada no tempo e no espaço. Ele experimenta a si mesmo, seus pensamentos e sentimentos como algo separado do resto, uma espécie de ilusão de ótica de sua consciência. Esta ilusão é uma espécie de prisão para nós, restringindo-nos aos nossos desejos pessoais e à afeição para algumas pessoas mais próximas a nós. Nossa tarefa deve ser a de nos livrarmos dessa prisão, ampliando o nosso círculo de compaixão para abraçar todas as criaturas vivas e toda a natureza em sua beleza."

Albert Einstein

RESUMO

A dissertação tem como objetivo investigar potencial da integração entre parametrização da forma, prototipagem rápida e preceitos biomiméticos, em resposta a questões bioclimáticas apresentadas por um artefato gerador de microclima para o clima quente e úmido. Este artefato funcionaria como sombreador paramétrico e concomitantemente, auxilia na mitigação do efeito de ilha de calor. O universo de estudo é a região metropolitana de Recife-PE. Os procedimentos metodológicos desta pesquisa são baseados no método desenvolvido pelo *Biomimicry Group* 3.8 (2011). A pesquisa utiliza métodos qualitativos e quantitativos em um estudo de caso dividido em cinco etapas. Primeiro é realizado uma contextualização através de uma revisão bibliográfica e do estudo de modelos naturais que evoluíram de forma a mitigar o calor. Segundo, é estabelecido princípios e critérios de design utilizando técnicas de *brainstorm*. Terceiro, estabelece um modelo paramétrico/algorítmico que colabora com a produção de modelos responsivos a partir da inclusão de uma simulação de incidência de radiação. Quarto, utiliza prototipagem rápida e técnicas de formação para materializar o protótipo idealizado. Quinto, apresenta uma avaliação comparativa do desempenho térmico dos materiais aplicados nos protótipos. Como resultado, o trabalho apresenta estratégias e abordagens para mitigação do efeito de ilha de calor. O teste térmico comparativo obteve resultado melhores que o de superfícies refletantes. O trabalho contribui com a compreensão do elo que pode ser estabelecido entre abordagens como a biomimética, bioclimatologia, parametrização da forma e prototipagem rápida aplicados ao design de edifícios.

Palavras-chaves: Bioclimatologia, Biomimética, Parametrização, Fabricação digital, Ilha de calor.

**MICROCLIMATE GENERATOR ARTIFACTS: BIOMIMICRY,
PARAMETERIZATION AND RAPID PROTOTYPING IN SEARCH FOR A
BIOCLIMATIC SOLUTIONS FOR HOT
AND HUMID CLIMATES**

ABSTRACT

The dissertation aims to investigate the potential integration of parameterization, rapid prototyping and biomimetic principles, in response to bioclimatic issues presented by a microclimate generator artifact for the hot and humid climate. This artifact functions as parametric shading device and, concomitantly assists in mitigating the heat island effect. The research geographical scope is the metropolitan region of Recife- PE. The methodological design procedures of this research are based on the design method developed by the Biomimicry Group 3.8 (2011). The research uses qualitative and quantitative methods through a case study divided into five stages. First it is conducted a contextualization through a literature review and study of natural models that have evolved to mitigate the heat. Second, it established principles and design criteria using brainstorming techniques. Third, it was established a parametric/algorithmic model that works with the production of responsive models from the inclusion of a radiation incidence of simulation. Fourth, it uses digital manufacturing tools for rapid prototyping and training techniques to materialize the idealized model. Fifth, presents a comparative evaluation of the thermal performance of materials used in prototypes. As a result, the study presents strategies and approaches to mitigate the heat island effect. The comparative thermal test showed better results than reflective surfaces. The work contributes to the understanding of the link that can be established between approaches such as biomimicry, bioclimatology, parameterization of form and rapid prototyping applied to building design.

Keywords: Bioclimatology, Biomimicry, Parameterization, Digital fabrication, Heat island effect.

SUMÁRIO

LISTA DE IMAGENS	XI
LISTA DE TABELAS	XVI
LISTA DE SIGLAS	XVII
APRESENTAÇÃO	1
OBJETIVOS.....	1
REFERENCIAL TEÓRICO	4
1 DA DISCUSSÃO DE SUSTENTABILIDADE À BIOMIMÉTICA NA ARQUITETURA	5
1.1 O cenário atual.....	5
1.1.1 Ilhas de calor	8
1.1.2 Impacto energético das construções	10
1.2 A busca por soluções	11
1.2.1 A compreensão da complexidade: um paradigma paralelo	11
1.2.2 Biomimética, a busca por uma visão holística.	14
1.2.3 Bioclimatologia	16
1.2.4 Metodologia de projeto em Biomimética	21
1.2.5 Forma em simbiose com desempenho	27
1.3 Considerações sobre o capítulo.....	30
2 DESIGN PARAMÉTRICO E ALGORÍTMICO	31
2.1 O pensamento paramétrico e algorítmico.....	31
2.1.1 Parametrização vinculada a simulações para desempenho	35
2.1.2 Scripting gráfico ou "linguagem de programação visual"	40
2.2 Fabricação e prototipagem com aporte de ferramentas Digitais.....	42
2.2.1 Seccionamento	45
2.2.2 Tesselação	45
2.2.3 Planificação/dobradura	45
2.2.4 Utilização de contornos.....	46
2.2.5 Formação.....	46
2.3 Considerações sobre o capítulo.....	50
3 PESQUISAS NO ESTADO DA ARTE.....	51
3.1 Estudos sobre mitigação do efeito de ilha de calor	51
3.2 Modelos naturais e considerações sobre materiais	55
3.2.1 Plantas e como promovem redução de temperatura.....	55
3.2.2 Fibras naturais para redução de temperatura superficial.....	58
3.2.3 Uso de hidrogéis para redução de temperatura superficial	58
MÉTODOS.....	61
4 PROCEDIMENTOS	62
4.1 Limitações	64
DESENVOLVIMENTO.....	66
5 DESENVOLVIMENTO DO PROBLEMA.....	67
5.1 Contexto – (des) conforto em Recife.....	67
5.1.1 Ilhas de calor em Recife	69
5.1.2 Considerações sobre as principais estratégias bioclimáticas de Recife	71
5.2 Identificação da função do artefato	74
5.3 Identificação de modelos naturais ao problema	74

5.4	<i>Brainstorm e estratégias</i>	74
5.4.1	<i>Estratégias aos "Princípios da vida"</i>	75
6	RESULTADOS	76
6.1	<i>Emulação dos princípios extraídos</i>	76
6.2	<i>Construção do modelo paramétrico</i>	78
6.2.1	<i>Modelagem piloto</i>	82
6.3	<i>Modelagem do elemento modular</i>	86
6.4	<i>Prototipagem</i>	89
6.4.1	<i>Prototipagem rápida</i>	89
6.4.2	<i>Formação</i>	93
6.5	<i>Análise dos materiais</i>	97
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
7.1	<i>Sobre a metodologia desenvolvida pelo Biomimicry group 3.8</i>	101
7.2	<i>Sobre a emulação de soluções da natureza para mitigação do calor</i>	102
7.3	<i>Sobre o processo de parametrização</i>	103
7.4	<i>Sobre a construção de protótipos e análise</i>	104
7.5	<i>Limitações encontradas e considerações para pesquisas futuras</i>	105
8	REFERÊNCIAS	107
9	APÊNDICE	114
9.1	<i>Infográficos</i>	114

Lista de imagens

Imagem 1. Mapa mental dos temas relacionados aos artefatos geradores de microclima proposto para a pesquisa. As linhas cheias indicam o agrupamento adotado no referencial teórico, as linhas tracejadas indicam os assuntos não agrupados, que também estão relacionados.....	3
Imagem 2. Charge do Angeli sobre a paisagem urbana do Rio de Janeiro.	6
Imagem 3. Charge sobre a crise energética brasileira que levou a uma sucessão apagões no país.....	7
Imagem 4. Perfil do efeito de ilha de calor. Fonte: Epa (2014).	9
Imagem 5. Porque ocorre o efeito de Ilha de calor. Fonte: Pivetta (2012).....	9
Imagem 6 e 7. O arquiteto Ken Yeang em 1995 estudou as diversas interações entre os artefatos humanos e o meio ambiente em seu livro projetando com a natureza. Fonte: traduzido pela autora a partir de Yeang (1995).	12
Imagem 8. Croqui de Le Corbusier, estudos solares, 1964.....	18
Imagem 9. Diagrama de Olgyay. Fonte: Adaptado e traduzido pela autora a partir de Olgyay e Olgyay (1963).	18
Imagem 10. Elementos arquitetônicos e interações com a radiação solar. Fonte: adaptado pela autora a partir de Lamberts <i>et al.</i> (2004) e Lechner (2014).....	20
Imagem 11 e 12 Projeto do Herzog & de Meuron para o Miami Art Museum que explora conexões entre arquitetura, clima e elementos naturais. O projeto exemplifica potenciais de reconexão.	22
Imagem 13 <i>Hydroceramic skin</i> . Material produzido no <i>Institute for Advanced Architecture of Catalonia em Barcelona</i> . Intenciona reproduzir um sistema de resfriamento passivo mais eficiente para envoltórias. Utiliza princípios de emulação da transpiração, semelhantes ao que ocorre com o suor da pele. Fonte: Rathee <i>et al.</i> (2014).....	23
Imagem 14 e 15. <i>Biomimicry Thinking</i> – De cima para baixo; Desafio de biologia / Biologia para Design. Fonte: adaptado de Biomimicry3.8 (2011a)	25
Imagem 16. Projeto Saara, que usa princípios biomiméticos. O projeto iniciou-se a partir do estudo da configuração da carapaça de um besouro que captura água do ar em desertos. A intenção do sistema gerado visa produção de alimentos e recuperação de áreas em processo de desertificação. Usa como recursos o sol e a água do mar. É realizado um processo de dessalinização da água, que uma vez doce, é utilizada para agricultura orgânica e alimentação da área de solo adjacente, revertendo o processo de desertificação das áreas adjacentes. O sal produzido é usado para produção de blocos na construção civil. O projeto gera um sistema que não produz resíduos, usa energia renovável e gera uma economia cíclica. Fonte: Pawlyn (201_).....	26
Imagem 17. Definição de performance. Fonte: Traduzido e adaptado pela autora a partir de Oxman (2010).	28
Imagem 18. Monocoque. Protótipo de uma pele com função estrutural, 2007, Museu de Arte Moderna de Nova York. Ilustra um processo de enrijecimento através de sua função estrutural baseado no algoritmo de voronoi. A simulação utiliza método de elementos finitos. Fonte: Oxman (2010).	29

Imagem 19. Construção de uma linha e de um polígono no <i>Grasshopper</i> para Rhinoceros 3D. Fonte: retirado de.....	34
Imagem 20. Uma caracterização genérica de solução de projeto. Fonte: traduzido pela autora a partir de Motta e Motta (1999).....	34
Imagem 21, 22. Elemento de sombra elaborado com ajuda de parametrização da forma e integradas a análise de desempenho. Fonte: Turrin <i>et al.</i> (2011).....	37
Imagem 23, 24. Elemento de sombra elaborado com ajuda de parametrização da forma e ferramenta de análise de desempenho. Fonte: Turrin <i>et al.</i> (2011).....	38
Imagem 25, 26. Uso de CFD aplicado ao modelo paramétrico para gerar recomendações urbanas. Fonte: Taleb e Musleh (2015)	39
Imagem 27. Interface do Grasshopper e seu “script gráfico”.....	41
Imagem 28 A interface do Diva é integrada a do Grasshopper, a imagem mostra simulação ocorrendo durante modelagem de uma superfície.	41
Imagem 29. Métodos de produção automatizada em arquitetura e construção. Adaptado pela autora a partir de Pupo, (2008).....	44
Imagem 30. Diferença entre processos diretos, fabricação digital e fabricação interativa. Fonte: Willis <i>et al.</i> (2011).....	44
Imagem 31 e 32. Exemplos do uso de seccionamento. Da esquerda para direita: seccionamento realizado com planos seriados e usando dois eixos. Fonte: Han (2014) e Lavayen e Viveros (2013)	47
Imagem 33. Aproximação de uma impressão 3D feita em plástico. Fonte: Reprap (2013)	47
Imagem 34. Exemplo de aplicação da técnica de tesselação em Fabricação digital. Fonte: Iwamoto (2008)	48
Imagem 35. Exemplo de aplicação da técnica de planificação e dobradura em Fabricação digital. Fonte: Robofold (2012).	48
Imagem 36. Construção de objeto a partir da definição de contornos que definem o desbaste. Fonte: Such (2015).....	49
Imagem 37. Uso de fôrmas em Fabricação digital. Fonte: Borbolla (2013)	49
Imagem 38. Peça de uma folha de oitizeiro mostrando seu tricoma. Fonte: Kitayama <i>et al.</i> (2010).....	57
Imagem 39. Imagens microscópicas do tricoma da folha do oitizeiro indicado pela legenda “tr” . Fonte: Monteiro <i>et al.</i> (2012).	57
Imagem 40. Imagens de infravermelho mostrando a maquete com telhado usando phema (esquerda) e o telhado usando PNIPAN (direita). Fonte: Rotzetter <i>et al.</i> (2012)	60
Imagem 41. Protótipo do painel cerâmico com hidrogel. Fonte: Rathee <i>et al.</i> (2014)	60
Imagem 42 e 43. Sala de teste térmicos do LABEME e fonte de radiação artificial.....	65
Imagem 44. Carta Psicométrica de Recife pelo método de Givoni. Fonte: Labeec (2010).....	68

Imagem 45. Modelo mostrando dados climático de Recife e zona de conforto adaptativa proposta pela ASHARE standard 55-2010. Fonte: elaborado a partir de Ashrae (2010).....	68
Imagem 46. Ilhas de calor em Recife em 1998 e em 2010. Fonte: Dos Santos (2011).....	70
Imagem 47. Aglomerado urbano de Recife. Fonte: imagem retirada deSouza e Corrêa (2012)	70
Imagem 48, 49 e 50 percurso do sol durante o ano com dados de temperaturas de bulbo seco para Recife-PE, respectivamente. Os pontos em azul indicam situações com temperatura abaixo de 20°C (0,1%). Os amarelos, temperaturas entre 20°C e 25°C (onde o sombreamento é importante) (18,08%). Os vermelhos indicam temperaturas superiores a 25°C (onde o sombreamento é necessário) (81,82%). Fonte: elaborado pela autora no grasshoper.....	72
Imagem 51. Máscara solar de Recife com escala de radiação global horizontal. O círculo vermelho mostra a isolinha que represente o ângulo 30° e a laranja o de 60°. Dentro desses círculos estão as maiores incidências de radiação.	73
Imagem 52. Taxonomia das soluções adotadas.....	77
Imagem 53. Funcionamento do modelo paramétrico gerado.....	79
Imagem 54. Modelo usado para teste. Ao associar o modelo 3D como <i>input</i> , o modelador passa a visualizar as isolinhas que indicam a incidência de radiação solar na superfície projetada.	80
Imagem 55. Edição do modelo visando estabelecer uma forma mais eficiente.....	80
Imagem 56. Ao modificar a forma, o modelo abre uma janela de simulação. Neste caso, esta etapa durou cerca de 2 segundos.	80
Imagem 57. A simulação integrada colabora com a compreensão do modelo.	81
Imagem 58. Após edição da forma, pode-se ligar a distribuição dos elementos de sombra, conforme especificação, associada a simulação computacional.	81
Imagem 59. Modelo gerado mostrando a simulação de incidência de radiação na superfície de um edifício proposto, enquanto o modelador trabalha o partido arquitetônico.....	83
Imagem 60. Resultado formal em pontos de vista sequenciados.	84
Imagem 61. Simulação mostrando os níveis de radiação incidente antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação dos brises.	84
. Imagem 62 Script gráfico básico gerado no Grasshopper.....	85
Imagem 63 Modelo dos elementos modulares.	87
Imagem 64 Montagem dos elementos modulares. A cima, montagem linear, a baixo, Inter travado.....	88
Imagem 65 e 66. Elemento modulares recém impressos.....	90
Imagem 67 e 68. Retirada do elemento impresso do reservatório do modelo.....	91
Imagem 69 e 70. Câmara de sopro e aspiração do pó excedente.	92
Imagem 71 e 72. Fôrmas de silicone. Fonte: autor.	94
Imagem 73 Resina bi-componente de óleo de mamona. Fonte: autor.....	95

Imagem 74 Poliacrilato de sódio não hidratado e hidratado. Fonte: autor.....	95
Imagem 75 Elemento recém retirado da fôrma, ainda sem acabamento. Fonte: autor.....	96
Imagem 76 e 77 A esquerda, elemento ao ser retirado da fôrma. A direita, as propriedades da resina permite curvatura do elemento. Fonte: autor.....	96
Imagem 78 e 79 Ensaio térmico. A cima é mostrado as superfícies em contato com a fonte de radiação. A baixo, as superfícies opostas.....	98
Imagem 80, 81, 82 e 83. Imagens de infravermelho do ensaio. De cima para baixo: As duas primeiras fotos foram tiradas durante os primeiros 10 min de experimento. A foto da esquerda mostra as superfícies em contanto com a radiação. A foto da direita mostra o lado oposto. As fotos de baixo mostram o ensaio após duas horas de experimento.	100

Lista de tabelas

Tabela 1. Característica que provocam o efeito de ilha de calor e seus respectivos efeitos no balanço de energia. Fonte: Gartland (2012)	8
Tabela 2. Comparação entre sistemas humanos e os sistemas biológicos. Fonte: Pawlyn (201_)	14
Tabela 3. Princípios da vida. Fonte: Biomimicry3.8 (2011b). Tradução do autor.	15
Tabela 4. Etapas e passos propostos para o <i>Biomimicry group 3.8</i>	24
Tabela 5. Funções esperadas para o artefato de acordo com o estudo do contexto.....	74
Tabela 6. Estratégias de emulação.	74
Tabela 7. Estratégias extraídas a partir dos princípios da vida. Fonte: autora, a partir de <i>Biomimicry Group 3.8</i> (2011).....	75
Tabela 8– <i>Inputs e outputs</i> do modelo gerado no Grasshopper.	78

Lista de siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHS	Ângulo Horizontal de Sombreamento
AVS	Ângulo Vertical de Sombreamento
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
EPA	<i>United States Enviromental Protection Agency</i>
IAAC	<i>Institute for Advanced Architecture of Catalonia</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LABEME	Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas
LABCON	Laboratório de Conforto Ambiental
LABMAQ	Laboratório de Maquetes
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LM+P	Laboratório de Modelos e Prototipagem
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

Apresentação

A poluição e impacto ambiental provocados pela construção civil são alarmantes e causam várias consequências, tais como: mudança da paisagem natural, aquecimento das áreas urbanas (efeito de ilha de calor), aumento do consumo de energia, aumento da poluição, dentre outros. Um projeto de arquitetura que não respeita a paisagem e a infraestrutura onde se insere, contribui para o aparecimento de graves problemas urbanos. Dois dos problemas intricadamente relacionados a más políticas de planejamento urbano e do design de edifícios, que serão abordados neste trabalho são as ilhas de calor, que trata do aumento de temperatura dentro de concentrações urbanas; e o aumento do consumo de energia elétrica causado por construções inadequadas bioclimaticamente.

A crescente valorização da arquitetura sustentável e a necessidade de revisão dos valores vêm trazendo melhorias. A concepção do projeto passou a ser mais criteriosa e prever medidas conservacionistas. Os estudos sobre complexidade nas últimas décadas também ascendem à importância de uma visão ainda mais holística em projeto. Dentro desse contexto, uma das correntes de pesquisa em crescimento, chama-se Biomimética. A biomimética trata do estudo das lógicas da natureza, modelos e performance visando aplica-los aos artefatos e atividades do homem.

Concomitantemente as discussões de sustentabilidade, a produção de projetos de arquitetura vem passando por mudanças de paradigma, algo semelhante ao período de popularização do acesso a computação gráfica. Na última década, vem ocorrendo uma difusão de técnicas de modelagens que utilizam processos algorítmicos e paramétricos, além da popularização da fabricação digital. Ambos colaboram com a efficientização de processos e possibilitam realizar links com simulação e bases de dados que colaboram na criação de soluções eficientes e até inovadoras. A fabricação digital facilita processos de prototipagem, estudo de sistemas novos e até produção de elementos arquitetônicos.

Este trabalho propõe explorar o link que pode ser estabelecido entre a biomimética, modelagem paramétrica/algorítmica e prototipagem. A hipótese é de que as três áreas em conjunto, podem colaborar com a criação de elementos arquitetônicos mais eficientes, otimizados e com formas complexas, possibilitando a inclusão de bases de dados e simulações de desempenho para estabelecer soluções. A fabricação digital, por sua vez, é um meio que possibilita materializar objetos complexos. Com base nesses argumentos, este trabalho foca neste elo como tendo potencial para pesquisas na área de projeto, arquitetura e design.

Objetivos

A dissertação tem como objetivo investigar o potencial da integração entre parametrização da forma, prototipagem rápida e preceitos biomiméticos, em resposta a questões bioclimáticas para o clima quente e úmido. O trabalho utiliza um estudo de caso apresentado por um artefato gerador de microclima. Este artefato funcionara como sombreador paramétrico e concomitantemente, responde, de forma a mitigar o efeito de ilha de calor. O universo de estudo é a Região Metropolitana de Recife-PE, porém a discussão é válida para climas quentes e úmidos semelhantes a Recife. Os objetivos específicos são:

- aplicação e avaliação da metodologia desenvolvida pelo *Biomimicry group* 3.8 que visa gerar soluções biomiméticas.

- identificação de soluções da natureza para mitigação da influência do calor (elenco de princípios biomiméticos).
- definição de processo de parametrização (a partir das condições de contorno e soluções pré-estabelecidas nos estudos de biomimética).
- construção de protótipos e análise.

Este trabalho está apresentado sob formato de uma pesquisa exploratória e utiliza métodos mistos para realizar um estudo de caso. Segundo Gil (2008), o objetivo de uma pesquisa exploratória é abordar e familiarizar-se com um assunto ainda pouco explorado. É uma abordagem que intenciona gerar hipóteses para pesquisas futuras como meio para incentivar soluções inovadoras com apelo em sustentabilidade.

A imagem 01 mostra a decomposição do tema central desta dissertação que guiou o percurso adotado pela pesquisa. A dissertação utiliza métodos qualitativos e quantitativos e está dividida em três partes: referencial teórico, métodos e desenvolvimento. O referencial teórico está dividido em três capítulos e aborda aspectos de sustentabilidade, complexidade e biomimética em design, enfatizando questões referentes ao desempenho térmico em micro e em macro escalas. Esta parte do trabalho também aborda conceituação de processos algorítmicos e paramétricos no design de edifícios, e faz considerações sobre prototipagem no contexto da popularização da fabricação digital (prototipagem rápida).

A segunda parte está dividida em apenas um capítulo, apresenta os tipos de métodos de pesquisa e os procedimentos sistemáticos estabelecidos para executar o objetivo geral e os objetivos específicos da dissertação. Os procedimentos foram divididos em cinco etapas: primeiro, a contextualização (problematização). Segundo, o estabelecimento de princípios e critérios de design (com base em princípios biomiméticos). Terceiro, elaboração do modelo paramétrico/algorítmico (utilizando *scripting* gráfico integrado a simulação de incidência de radiação). Quarto, prototipagem. Quinto, de avaliação dos protótipos.

O desenvolvimento refere-se ao processo da pesquisa elaborado diretamente pela autora, com base nos procedimentos metodológicos e está dividida em três capítulos. O primeiro, desenvolvimento do problema, busca uma compreensão mais local do contexto bioclimático em que se insere a pesquisa, a cidade de Recife-PE. O segundo, resultados, apresenta as etapas práticas que visam produzir indicadores para hipóteses de pesquisa e abrir discussões para pesquisas futuras. O terceiro, considerações finais, discute os resultados encontrados, aponta contribuições da pesquisa e também algumas limitações encontradas, além de indicativos para pesquisas futuras.

Ao final, a dissertação oferece estratégias e abordagens para mitigação do efeito de ilha de calor e apresenta um teste térmico comparativo dos artefatos idealizados que obteve resultados positivos. Além disso, contribui com a compreensão do elo que pode ser estabelecido entre abordagens como a biomimética, bioclimatologia, parametrização da forma e prototipagem rápida, aplicadas ao design de edifícios. O apêndice deste trabalho apresenta infográficos realizados anteriores à fase de prototipagem desta pesquisa, e colaboram com a compreensão das abordagens do estudo de caso.

Referencial teórico

O referencial teórico aborda aspectos de sustentabilidade e complexidade em projeto, enfatizando questões referentes ao desempenho térmico em micro e macro escala. Esta parte do trabalho também aborda conceituação de processos paramétricos e algorítmicos em projeto e faz considerações sobre prototipagem no contexto da popularização da fabricação digital. O referencial está dividido em três partes: Da sustentabilidade à biomimética na arquitetura; design Paramétrico/algorítmico e Pesquisas no estado da arte. A primeira, aborda questões referente à biomimética e bioclimatologia em Arquitetura. A segunda aborda aspectos de parametrização e uso de design algorítmico em modelagem para colaborar com soluções mais integradas. A terceira parte aborda estudos recentes sobre ilha de calor, focando em estratégias de mitigação e estudos de modelos naturais termorreguladores (plantas) para inspiração de design.

1 Da discussão de sustentabilidade à biomimética na Arquitetura

O universo de temas abordados neste capítulo foi selecionado em decorrência da decomposição da ideia principal da pesquisa e está ilustrado, conforme mostra o mapa mental apresentado na apresentação. Este capítulo do referencial teórico está dividido em três partes. A primeira, traça um panorama geral dos problemas relacionados à indústria da construção civil: **O cenário atual**. A segunda apresenta pesquisas na área, que visam à prática de projeto mais responsável: **A busca por soluções**. Ao final deste capítulo, é apresentado uma conclusão da autora sobre os pontos comuns entre as soluções pesquisadas: **Considerações sobre o capítulo**.

1.1 O cenário atual

As alterações climáticas registradas nas últimas décadas, o crescimento desordenado das cidades, e a previsão do esgotamento dos recursos naturais, reforçam a importância das mudanças de hábitos. Ou seja, todos somos responsáveis pelo bem estar geral do ecossistema. A preocupação com crescimento sustentável inicia-se com força na década de 70, em geral, restringia-se às esferas econômica e ambiental (ROAF *et al.*, 2007). Em 1983, a ONU criou a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, e definiu pela primeira vez o conceito de desenvolvimento sustentável como tendo três vertentes principais: o planejamento economicamente viável, ecologicamente correto, e socialmente justo (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987). Gradativamente a ideia de sustentabilidade passou a ser aplicada em várias áreas de atividades humanas, especialmente na arquitetura onde a necessidade da adoção de medidas eficientes e com comprometimento é cada dia mais evidente.

No campo do projeto em arquitetura as discussões se intensificam com a identificação de sua correlação com o desordenamento das cidades e com a chegada das primeiras crises energéticas (KAZAZIAN; ROAF *et al.*, 2007). A alteração da paisagem provocada pela implantação de construções é visível. Dentre os malefícios diretos gerados estão à alteração do microclima, o aumento do desmatamento, a erosão do solo, a redução da área permeável, dentre outros. Um projeto de arquitetura que não respeita a paisagem e a infraestrutura onde se insere, contribui para o aparecimento de graves problemas urbanos. As imagens 02 e 03 mostram charges de jornais brasileiros, que ilustram alterações que possuem relação com planejamento em arquitetura e urbanismo.

Dois problemas intricadamente relacionados as más políticas de planejamento urbano e de projeto de arquitetura, abordados neste trabalho são as ilhas de calor, que trata do aumento de temperatura dentro de concentrações urbanas; e o aumento do consumo de energia elétrica causado por construções inadequadas bioclimaticamente.



Imagem 2. Charge do Angeli sobre a paisagem urbana do Rio de Janeiro.



Imagem 3. Charge sobre a crise energética brasileira que levou a uma sucessão apagões no país.

1.1.1 Ilhas de calor

Um exemplo de fenômeno dentre os mencionados anteriormente é o efeito de “ilha de calor”. Este termo descreve a diferença de temperatura entre regiões urbanas e áreas rurais próximas. A substituição de áreas vegetadas por edifícios e pela infraestrutura urbana, tal qual se é pensado atualmente, é a principal causa do Efeito de Ilha de Calor. A substituição da permeabilidade e de superfícies úmidas por superfícies impermeáveis e secas pode resultar em significativas diferenças de temperatura na superfície urbana e na atmosfera imediata. Isso provoca o aumento de temperatura e uma diversidade de consequências, como: o aumento do consumo de energia nos edifícios e o aumento da concentração de gases que provocam o efeito estufa, dentre outros (EPA, 2014).

“Temperaturas do ar numa área urbana densa são maiores do que as temperaturas de áreas rurais adjacentes (...). O fenômeno conhecido como “ilha de calor” foi primeiramente noticiado por meteorologistas a mais de um século atrás, e é o mais bem documentado fenômeno de modificação climática. (...), a ilha de calor está presente em qualquer cidade e é a mais óbvia manifestação climática advinda da urbanização.” Santamouris, M (2001); p. 48; traduzido pela autora.

Em consequência das alterações apresentadas no balanço de energia, o clima das cidades apresenta características específicas que o diferem das áreas rurais adjacentes. Sendo as ilhas de calor um dos fenômenos climáticos mais característicos da modificação térmica provocada pelas cidades (OKE, 1982; SANTAMOURIS, M., 2001). Há documentos relatando o fenômeno de ilha de calor já no século XIX (GARTLAND, 2012). Oke (1982) um dos pioneiros a descrever a relação entre a forma urbana e o desempenho ambiental, cita que as causas da ilha de calor estão no **calor antropogênico, na poluição do ar, nas superfícies urbanas e suas propriedades térmicas e na geometria urbana**. As ilhas de calor apresentam sua máxima intensidade em períodos específicos do dia e tem seu período de maior desenvolvimento depois do pôr-do-sol (imagem 4).

As ilhas de calor são caracterizadas pela diversidade de temperaturas em áreas diferentes de uma mesma cidade. Estas transformações provocadas pela urbanização levam a alterações no comportamento dos elementos atmosféricos, que interferem no balanço de radiação, estoque de calor, umidade, circulação do ar e emissão de poluentes (Tabela 01) (GARTLAND, 2012). Tais características devem-se as mudanças nas propriedades de albedo, condução e emissividade dos materiais empregados na construção civil, obstrução da abóbada celeste (*sky view fator*) pelos altos edifícios, supressão de áreas verdes e de superfícies úmidas, entre outros, provocando modificações do comportamento do microclima urbano (imagem 5).

Tabela 1. Característica que provocam o efeito de ilha de calor e seus respectivos efeitos no balanço de energia. Fonte: Gartland (2012)

Características que contribuem para o efeito de ilha de calor	Efeito no balanço de energia
Falta de vegetação	Redução da evaporação
Aumento de superfícies impermeáveis	Redução da evaporação
Alta difusividade térmica dos materiais urbanos	Aumento do estoque de calor
Baixa refletância solar nos materiais urbanos	Aumento da transferência de calor
Geometria urbana que aprisiona calor	Aumento da transferência de calor
Geometria urbana que prejudica ventilação	Redução da convecção
Aumento dos níveis de poluição	Aumento da transferência de calor
Aumento do consumo de energia	Aumento do calor antropogênico.

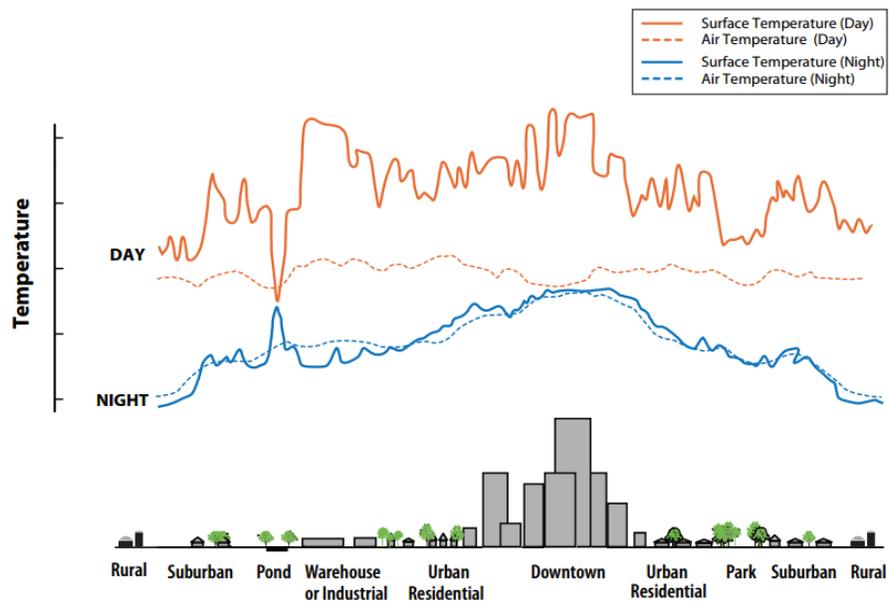


Imagem 4. Perfil do efeito de ilha de calor. Fonte: Epa (2014).

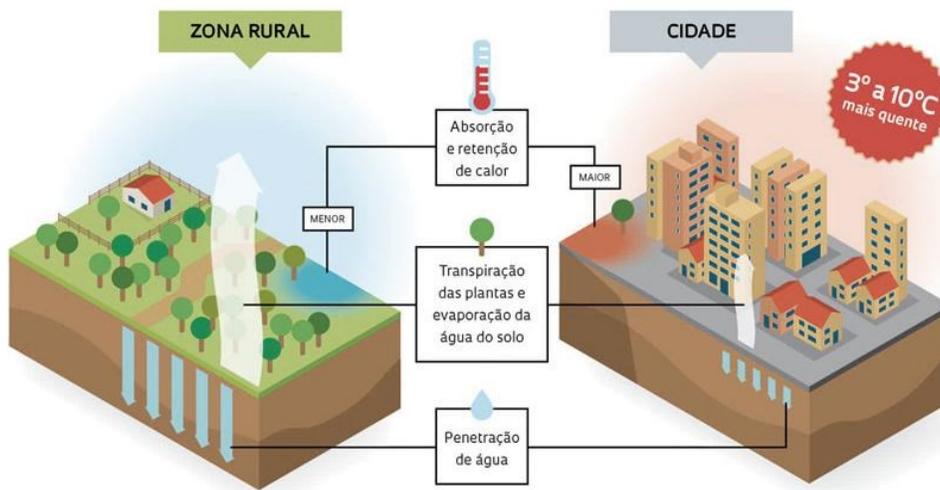


Imagem 5. Porque ocorre o efeito de Ilha de calor. Fonte: Pivetta (2012).

A substituição das áreas verdes por construções e pela pavimentação altera a capacidade de absorção dos raios solares pela superfície durante o dia. O concreto, os tijolos e o asfalto absorvem a radiação solar direta, e passam a irradiar calor. Mesmo após o anoitecer, esses materiais continuam liberando energia e aquecendo o ar noturno até a alvorada. Eles funcionam como “baterias” acumuladoras de calor (WONG e YU, 2005). Principalmente em climas quentes, as ilhas de calor afetam a qualidade do espaço urbano. As principais consequências da presença das ilhas de calor são:

- o aumento do consumo de energia;
- o aumento de emissões de poluentes do ar e de gases que provocam efeito estufa;
- compromete a saúde humana;
- compromete o conforto térmico;
- debilita a qualidade da água.

Estudos apresentados pela Epa (2014) estimam que, em períodos quentes, para cada aumento de 0,6°C verifica-se um aumento de 1,5 a 2% do pico da demanda elétrica. A demanda aumentada de energia elétrica por sua vez, contribui para o aumento da poluição do ar e do calor antropogênico, que por sua vez afetam a saúde humana. A formação de ilhas de calor gera um ciclo negativo que retroalimenta o efeito de ilha de calor. Ou seja, as soluções afetam cenários individuais e coletivos em diversas esferas. Percepções de valores de possíveis estratégias para mitigar esses efeitos são também uma boa saída para uma transformação urbana positiva (SANTAMOURIS, M., 2001).

1.1.2 Impacto energético das construções

Outro efeito negativo de soluções arquitetonicamente inadequadas é o aumento do consumo de energia elétrica dentro de edifícios. Na segunda metade do século XX, o aparecimento e diversificação das tecnologias de condicionamento artificial e iluminação, resultou em grandes mudanças nas edificações. Os meios de prover conforto, através de um planejamento que considerava o entorno natural passaram a ser ignorados pelos projetistas. Essa atitude em conjunto, elevou o consumo de energia de forma exponencial em diversos países (ROAF *et al.*, 2001; LAMBERTS *et al.*, 2004). O impacto desses problemas com o tempo acendeu a compreensão de que é preciso trabalhar de forma conjunta: priorizar o planejamento considerando condicionamento natural e associá-lo ao planejamento de condicionamento artificial e dessa forma, prover mais conforto, qualidade ambiental e redução de consumo de energia (ROAF *et al.*, 2007; KEELER e BURKE, 2013).

No Brasil o consumo elétrico vem aumentando gradativamente. O aumento está relacionado ao desperdício consequência da falta de planejamento adequado dos projetos de arquitetura, da expansão demográfica, do aumento ao acesso de tecnologias que consomem energia elétrica e do avanço da economia. O recomendável para evitar um colapso energético semelhante ao ocorrido no Brasil em 2001 é investir em políticas mais rígidas de eficiência energética (LESSA, 2001; LAMBERTS *et al.*, 2004).

Em decorrência das mudanças descritas, em todo mundo vem surgindo leis, normas e etiquetas de eficiência energética e sustentabilidade para o espaço construído. Muitas fundamentadas em leis governamentais e outras por iniciativa privada. Visam à etiquetagem ou a premiação de edificações de baixo impacto, como exemplo pode-se citar: LEED, BREEAM, AQUA, ENERGYSTAR, PROCEL.

No Brasil, após o apagão de 2001, O então presidente Fernando Henrique Cardoso sancionou a lei 10.295 de 17 de outubro de 2001 que cria o Programa Brasileiro de Etiquetagem, o Procel-edifica (LAMBERTS *et al.*, 2004). O programa tem um viés voltado ao projeto de edificações. Ele visa avaliar a eficiência energética dos edifícios

segundo três características: o projeto da envoltória da edificação (arquitetura), o sistema de iluminação, e o sistema de condicionamento artificial (PROCEL, 2013). A previsão era de que a etiqueta fosse obrigatória no início dos anos 2010 para edificações acima de 500m², porém o fato não ocorreu. Ainda em 2015 a etiqueta vem sendo aplicada apenas de forma experimental em grande parte do país.

1.2 A busca por soluções

Segundo Lamberts *et al.* (2004) para atenuar o risco de esgotamento do potencial de geração de energia elétrica, é necessário atuar na otimização do seu uso por meio da produção de edificações mais eficientes energeticamente. Essas edificações não somente consideram uso de equipamentos elétricos eficientes, mas principalmente, a produção projetos que utilizem recursos do clima para que ocorra economia nos sistemas de iluminação e condicionamento de ar, por exemplo. Essas medidas em larga escala contribuem para evitar o aumento do consumo elétrico do país e em pequena escala contribuem na economia de energia elétrica da edificação.

O problema do efeito de Ilha de Calor também indica que é imperativo um planejamento do espaço urbano que se inicia em pequena escala, na escolha dos materiais arquitetônicos. Essas estratégias devem ser somadas a estratégias de permeabilidade e integração com paisagismo (Santamouris, 2001). A deficiência das considerações programáticas de proposições em micro escala e suas implicações na macro escala é uma das principais razões para ambos os problemas. Nas últimas décadas, estudos sobre complexidade, sinalizam a importância de uma visão mais “holística¹” em projeto. Os parágrafos a seguir, abordam sucintamente essa discussão e explora repercussões desses estudos no campo de projeto.

1.2.1 A compreensão da complexidade: um paradigma paralelo

Os estudos sobre complexidade surgiram durante o século XX, na década de 70, a partir de avanços nas ciências na área de física e meteorologia (GLEICK, 1987). Neste período, os pesquisadores notaram a necessidade de uma abordagem que compreendesse os fenômenos naturais levando em consideração sua posição como parte de um universo mais abrangente e não apenas isolado. Com o tempo, percebeu-se que a lógica serve para todos os campos de atividade humana, não apenas para compreensão de fenômenos naturais (BAR-YAM, 1997; PALAZZO, 2004).

Explicando em outras palavras, compreendeu-se que pequenas alterações nas condições iniciais de um cenário poderiam resultar na ocupação de um estado completamente diferente, em decorrência das diversas interações entre as partes envolvidas. Ou seja, não se pode isolar fenômenos ou sistemas do ambiente que o compõe, sob o erro de que isso ocasione em grandes desequilíbrios em cenários posteriores (GLEICK, 1987; BAR-YAM, 1997; PALAZZO, 2004).

Essa discussão sobre complexidade impacta no projeto, quando o designer passa a se perceber como parte de um sistema maior. Os componentes atuantes e inseridos artificialmente são todos os artefatos que usamos como interface para interagirmos com o mundo. Sendo que, esses artefatos funcionam como um micro sistema inserido em outro maior (YEANG, 1995) (imagens 6 e 7).

¹ Holismo é o entendimento integral dos fenômenos, em oposição ao procedimento analítico em que seus componentes são analisados apenas isoladamente.

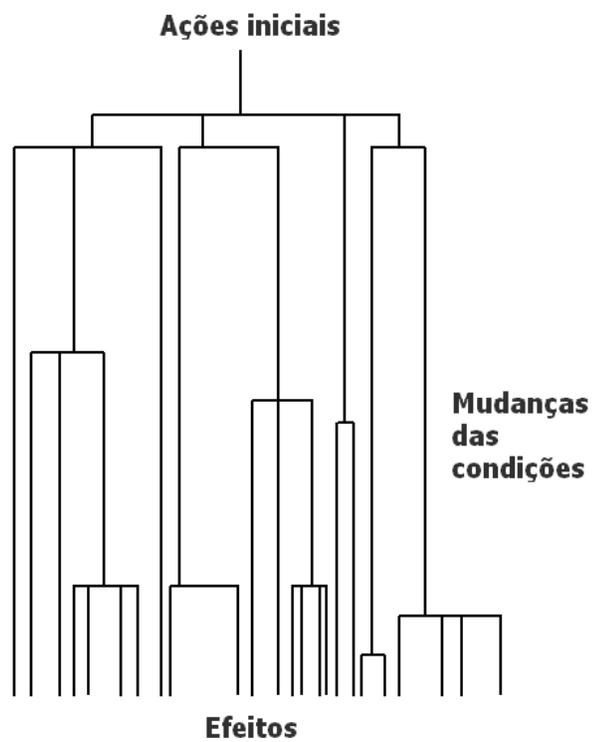
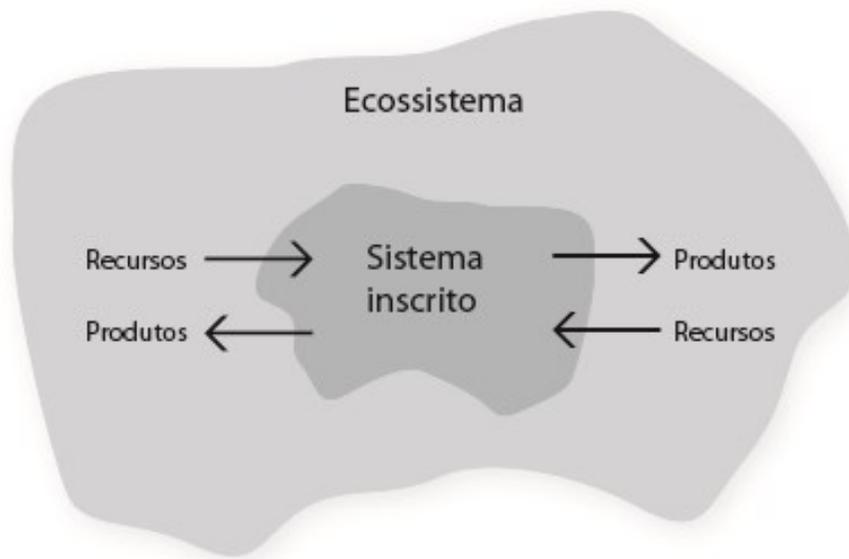


Imagem 6 e 7. O arquiteto Ken Yeang em 1995 estudou as diversas interações entre os artefatos humanos e o meio ambiente em seu livro projetando com a natureza. Fonte: traduzido pela autora a partir de Yeang (1995).

Edifícios também fazem parte desse raciocínio. Eles interagem com o meio ambiente. Essa interação interfere no desempenho do edifício, mas também resulta em mudanças no meio ambiente. Yeang (1995) apresenta um estudo sobre as interações entre edifícios e a natureza. O autor, a partir de então, propõe que se projete através da analogia do próprio ecossistema (*Ecomimicry*). Seu trabalho apresenta conclusões sobre bioclimatologia e estratégias simbióticas² de projeto (YEANG, 2006).

O projetista promove comunicação e faz parte de um sistema mais amplo e isso implica em responsabilidades éticas/ambientais (FLUSSER e CARDOSO, 2007). As complexas relações associadas a um projeto durante o tempo, muitas vezes não são previstas em projeto. E em decorrência saem do controle de seu criador. Por isso é importante compreender a teoria dos sistemas complexos no contexto do design. Já que, qualquer coisa projetada e posta no mundo fará parte de um ecossistema.

Através do estudo da complexidade identifica-se um paradoxo relacionado à atividade humana de classificar e muitas vezes dissociar categorias umas das outras: a separação de um sistema em partes distintas pode gerar uma visão reducionista, pois um sistema complexo **não** pode ser analisado ou separado em um conjunto de elementos independentes sem ser destruído. Em contrapartida, entender o sistema inteiro apenas como um todo, pode também gerar um erro, porque tendemos a percebê-lo como um único organismo, e isso é simplificá-lo (BAR-YAM, 1997). Através deste paradoxo, pode-se fazer um paralelo e questionar a classificação de projeto em áreas dissociáveis. As áreas são dissociáveis umas das outras? Nesses termos, como separar disciplinas no campo de projeto? Ou mais: como considera-lo no todo sem cair no erro de simplificá-lo?

Bar-Yam (1997) discute que a construção de uma visão complexa deve, buscar uma visão holística capaz de transcender o reducionismo. Permitindo a modelagem de sistemas que apresentam simultaneamente dois aspectos: a característica da distinção e da conexão. A primeira, mostra que existem elementos que podem ser separáveis do todo de uma forma abstrata. E a segunda, muito importante, indica como esses elementos são indissociáveis do todo e entre si, sendo uma característica dinâmica (BAR-YAM, 1997).

A compreensão das partes envolvidas e também da natureza da conexão entre as partes que culminam no todo, traz uma série de abordagens, que vem impactando na revisão dos processos do homem em diversas áreas de trabalho, incluindo o projeto. Um exemplo de revisão de processo nesse contexto é o apresentado por Christopher Alexander em seu livro o *Pattern Language* (ALEXANDER *et al.*, 1968). O autor claramente propõe uma metodologia que considere as interações das soluções de pequena escala até larga escala. Segundo o autor:

“Esta é uma visão fundamental de mundo, uma visão que nos diz que quando construímos uma coisa não podemos limitar-nos a construí-la isoladamente, se não que também temos que intervir no mundo que a rodeia, e dentro dela, de modo que esse mundo mais amplo se torne mais coerente nesse lugar, seja mais um todo; e essa coisa que fazemos tem um lugar na rede da natureza, tal como a fazemos.” Alexander *et al.* (1968). Pág.11. Tradução da autora.

Como afirmado anteriormente, a discussão e o contexto dos estudos de complexidade tiveram influência na criação de várias de ferramentas contemporâneas de auxílio ao projeto e também ampliou a forma de olhar os problemas humanos. Um dos campos influenciados pela discussão é a biomimética.

² Simbiose é uma relação mutuamente vantajosa entre dois ou mais organismos.

1.2.2 Biomimética, a busca por uma visão holística.

Biomimética é um campo emergente da ciência que visa o estudo dos fluxos e lógicas da natureza como princípio e inspiração para solução de problemas de design (BENYUS, 1997). A palavra “biomimetismo” se origina no grego: *bio* - vida mais *mimetikos* – imitação. Segundo Benyus (1997), a Biomimética busca compreender a ordem natural das coisas, uma compreensão complexa do ecossistema para promover uma real adaptação do homem ao meio. A autora acredita que a natureza deve ser vista como **modelo, medida e mentora** do *design*, sendo esse o princípio-base da biomimética. A biomimética busca uma compreensão holística aplicada a projeto. Ela parte do princípio, que a vida se sustenta na terra a mais de 3,85 bilhões de anos e nesse período vem resolvendo problemas e evoluindo com soluções extremamente elegantes e eficientes. Portanto é um meio lógico de inspiração para projeto, que poderia eficientizar todos os processos humanos, pois muitos processos se sustentam em princípios contrários aos da natureza. A tabela 2 apresenta diferenças entre sistemas humanos e sistemas naturais.

Tabela 2. Comparação entre sistemas humanos e os sistemas biológicos. Fonte: Pawlyn (201_)

Sistemas feitos pelo homem	Sistemas Biológicos
Simple	Complexo
Fluxo dos recursos lineares	Fluxo de recursos cíclicos
Desconectado e mono-funcional	Densamente interconectado e simbiótico
Resistente a mudanças	Adaptado a mudanças
Produz resíduo	Zero resíduo
Toxinas com degradação prolongada utilizada frequentemente	Toxinas com degradação prolongada não são utilizadas
Frequentemente centralizada e monocultural.	Distribuído e diversificado
Dependente de combustíveis fósseis	Movido a partir da geração solar corrente
Projetado para maximizar um objetivo	Sistema otimizado como todo
Extrativista	Regenerativo
Usa recursos globais	Usa recursos locais

Essa discussão traz além de princípios de *design*, também questionamentos éticos. Por exemplo, segundo Benyus (1997), seria incoerente o uso de conhecimento em biomimética para fabricação e melhoramento de armamentos, ou artefatos de destruição. Algo semelhante já ocorreu com a Biônica, área de estudo que teve origem na década de 50 e visava melhoramento de artefatos com base no estudo de estruturas naturais. Parte das pesquisas foi utilizada para promover evolução tecnológica na indústria de armamentos. Em contraponto a biônica, biomimética nasceu em busca da adequação do homem e de seus artefatos, processos e sistemas aos princípios lógicos da vida, buscando por uma real sustentabilidade e não apenas melhoria tecnológica.

Essa visão envolve uma observação cuidadosa de princípios comuns responsáveis pela “sustentabilidade” do ecossistema. Dessa forma, traduzir esses princípios em conceitos de projeto. Incorporando-os em produtos, processos, espaço físico e outras atividades de projeto. Em 2004 uma série de princípios foi elencada para que colaborassem com a melhoria de processos em diversas áreas de atuação humanas. Foram nomeadas de “princípios da vida”. Posteriormente, foram melhoradas, chegando à versão apresentada em 2011 pelo *Biomimicry group* 3.8³. Esses princípios impactam, não apenas no produto final, mas também na revisão dos processos, gerenciamento de dados e modelos de equipes de trabalho. São seis princípios ao todo (Tabela 3):

³ Grupo de pesquisa fundado por Janine Benyus, escritora do livro: *Biomimicry : innovation inspired by nature*.

Tabela 3. Princípios da vida. Fonte: Biomimicry3.8 (2011b). Tradução do autor.

Evoluir para sobreviver	Envolvem estratégias de gerenciamento de informações. Listando: datar estratégias; identificar abordagens de sucesso anteriores; identificar erros; integrar soluções alternativas a um mesmo problema; e evoluir as abordagens criando novas opções de soluções.
Ser eficiente (materiais e energia)	Envolvem estratégias de efficientização do sistema. Integrar múltiplas necessidades em soluções elegantes (evitar desperdício); minimizar o consumo energético; buscar fontes renováveis; gerenciar o uso de materiais em ciclo, ou seja, planejar o ciclo de vida. Segundo este preceito, a forma deve seguir o desempenho pretendido.
Adaptar-se as condições de mudanças	Envolvem estratégias de resiliência. Incluir soluções que permitam resiliência, redundância e descentralização do sistema. Permitir a adição de energia e matéria, desde que voltado para reparar/sanar e melhorar o desempenho do sistema. Incorporar a diversidade que rodeia o sistema (estudar processos, funções e formas para prover um melhor funcionamento).
Integrar conhecimento e crescimento	Envolvem estratégias de organização. Combinar elementos modulares e sistemas que evoluem do simples para o complexo; compreender o funcionamento do todo e também dos pequenos componentes e sistemas que o compõe; ser capaz de construí-lo de escala micro até a macro; criar condições para que os componentes interajam de uma forma que o todo consiga ter propriedades de auto-organização.
Ser atento e responsivo as questões locais	Envolvem estratégias de responsividade ao local. Usar materiais de fácil acesso (local e energético); cultivar processos de cooperação mútua, onde todos ganham; tirar proveitos de fenômenos locais que se repetem (clima, outros ciclos, etc); incluir o fluxo de informações em processos cíclicos, nunca lineares.
Usar química amigável a vida	Envolvem estratégia do uso de materiais. Usar poucos elementos de uma forma elegante; usar química favorável à vida, ou seja, evitar produtos tóxicos; usar água como solvente.

Em arquitetura é importante a adequação desses princípios visando criação de métodos mais responsáveis de projeto. Segundo Gruber (2011); biomimética na arquitetura, não implica somente no biomorfismo. A mera transferência da forma é insuficiente para trazer qualidades à construção. O princípio da biomimética está relacionado à criação rigorosa de construções leves, do planejamento do uso ativo e passivo de energia e da investigação de processos naturais e princípios do meio ambiente. Papanek (1972) já discutia que esse tipo de abordagem é uma grande fonte de inspiração para criatividade do projetista e culmina naturalmente na criação equipes interdisciplinares de projeto.

A neurociência atualmente vem identificando que o homem possui uma dependência natural de estar em contato com a natureza e/ou a elementos que façam referencia a sua complexidade (SALINGAROS e MASDEN II, 2008). Segundo os autores, considerando que o *design* e a arquitetura tem como base a criação de artefatos para o homem, é interessante enxergar também esse desejo transcendental. Nesses termos, os pesquisadores defendem o conceito de Biofilia (Bio=natureza; filia=amor) em arquitetura. Os princípios da Biofilia se confundem aos da Biomimética, porém na biofilia também há a intenção clara de tornar os espaços livres de gatilhos que provoquem stress e ansiedade ao ser humano (RYAN *et al.*, 2014). Segundo Salingaros e Mehaffy (2006) os espaços que acompanham esses conceitos tem um efeito tal no homem, que atingem até um patamar de cura, por isso, é comum verificar princípios construtivos da biofilia em templos e em áreas de meditação.

Os autores elencaram cinco pontos que contribuem para o bem estar do ser humano e que estão diretamente relacionados à sinergia da natureza com arquitetura e urbanismo (SALINGAROS, 2010). Já Ryan *et al.* (2014) elencaram 14 padrões. Estes se encaixam dentro dos princípios elencados anteriormente por Salingaros, com

um adicional de um componente de conforto térmico luminoso e de ventilação. A partir das duas abordagens, foi elaborada a seguinte lista de princípios biofílicos:

1. Acesso a ar puro, água, abrigo, e ao espaço vivo;
2. Acesso à informação biofílica do ambiente natural; plantas, árvores e animais;
3. Acesso à informação biofílica na construção do espaço: textura, cor, cheiro, ornamento/biomorfismo e arte;
4. Acesso a outros seres humanos dentro de um ambiente livre de ansiedade: o espaço público urbano de acesso aberto, espaços residenciais e comerciais;
5. Proteção contra a geração de ansiedade na vida urbana: evitar tráfego de alta velocidade, veículos de grande porte.
6. Conforto térmico, luminoso e qualidade de ventilação.

Paralelamente e anterior aos estudos de biomimética e biofilia, identificou-se na arquitetura a necessidade de estudar sua interação com a natureza através do estudo do clima no qual o projeto se insere. A área que estuda essa interação chama-se Bioclimatologia. A bioclimatologia estuda os ciclos naturais do clima como estratégia de projeto, aborda estratégias de eficiência energéticas passivas e visa à produção de espaços confortáveis.

Apesar de ter nascido independentemente, pode-se dizer que a área está intrinsecamente relacionada à biomimética e a biofilia. Por exemplo: o item dos princípios da vida: “ser atento e responsivo as questões locais” integra-se as discussões de bioclimatologia, bem como o item “ser eficiente”. Em biofilia o item 6 tem relação direta aos estudos de bioclimatologia. Também é possível associar as duas áreas aos itens 1 e 2. A seguir, será abordado bioclimatologia na arquitetura como área relacionada ao projeto proposto pela biomimética.

1.2.3 Bioclimatologia

Na arquitetura, a área de pesquisa que estuda a integração de soluções com o clima, chama-se **bioclimatologia**. Ou seja, compreende a interseção de soluções com o clima e os efeitos em cadeia que o projeto arquitetônico pode causar (ROAF *et al.*, 2001). O principal propósito da arquitetura bioclimática é encontrar soluções adequadas localmente para prover conforto, bem estar e eficiência energética. Corbella e Yannas (2003) conceitua da seguinte forma:

“A arquitetura sustentável é a continuidade mais natural da bioclimática, considerando também a integração do edifício à totalidade do meio ambiente, de forma a torná-lo parte de um conjunto maior. É a arquitetura que quer criar prédios objetivando o aumento da qualidade de vida do ser humano no ambiente construído e no seu entorno, integrando com as características da vida e do clima locais, consumindo a menor quantidade de energia compatível com o conforto ambiental, para legar um mundo menos poluído para as futuras gerações.” Corbella e Yannas (2003), pág 17.

Do ponto de vista energético, é imperativo que haja uma integração planejada entre clima e arquitetura. A citação do Corbella, porém, indica que o projeto bioclimático provê mais que eficiência energética, segundo o autor, também colabora com a **integração** do edifício ao meio ambiente e tem por objetivo o aumento da qualidade de vida do ser humano, pois providencia ambientes mais saudáveis e também maior contato do homem com características da natureza. É importante a identificação desses propósitos, para evitar o erro de confundir bioclimatologia e eficiência energética com a simples redução de custos de uma edificação, os quais podem

culminar no empobrecimento da qualidade do ambiente interno, e na criação de “edifícios doentes”⁴, assim como ocorreu com os primeiros edifícios “eficientes” norte americanos na década de 70 (ROAF *et al.*, 2001).

O primeiro pesquisador a cunhar o termo em Arquitetura foi o Olgyay. Segundo Szokolay, 1998; o termo bioclimatologia (ou o adjetivo bioclimático) já era usado na década de 30 na área da meteorologia. Na arquitetura, publicações correlatas ao tema já eram encontradas na Austrália na década de 40, mas apenas na década de 50 aparecem os primeiros artigos usando cunhando o termo bioclimatologia aplicado à arquitetura (OLGYAY, 1953; PAGE, 1958; SZOKOLAY, 1998). Em 1964 Le Corbusier publica o livro (*tropical architecture*) que torna muitos conceitos populares entre arquitetos (imagem 8) (SZOKOLAY, 1998).

Olgyay e Olgyay (1963) acreditava que a expressão arquitetônica deveria ocorrer em simbiose com mais três variáveis: a climática, a biológica e a tecnológica (imagem 9). Sendo a variável climática relacionada ao lugar onde será construído, as variáveis biológicas relacionadas às necessidades humanas e naturais, e a variável tecnológica que está relacionadas às soluções e fabricação. O conjunto das três permitiria uma unidade arquitetônica balanceada climaticamente.

Yeang (2006) aborda a bioclimatologia como estratégia essencial para um projeto simbiótico. Essa abordagem é vital para reduzir o consumo de energias fósseis durante a vida útil do edifício. Segundo o autor o projeto tem que primeiro considerar estratégias passivas para criar condições de conforto. Sendo que o projeto sustentável deve considerar a otimização desses processos que visam o baixo consumo energético através de soluções passivas que envolvem o clima externo. As estratégias têm efeitos diretos na forma final do projeto. Sistemas passivos visam promover condições de conforto usando energia com fontes naturais como a radiação solar, ventilação, umidade de superfícies, vegetação, ganhos de calor, etc.

(...) A energia que flui neste sistema são de fontes naturais como a radiação, condução e convecção sem o uso de meios mecânicos. Estes variam de um clima para outro. Em climas frios, o projeto ecológico deve ser feito para maximizar os ganhos através do sol, mas em climas quentes, o arquiteto deve priorizar reduzir ganhos solares e maximizar a ventilação natural. Yeang (2006), pág. 191.

Segundo Yeang (2006) os principais métodos para o projeto passivo são:

- Planejamento da forma do layout e do edifício em si;
- Estudo da orientação;
- Planejamento dos elementos da fachada (aberturas, fechamento e materiais);
- Planejamento de estratégias de controle solar;
- Estudo para iluminação natural;
- Estudo para ventilação natural;
- Estudo da integração paisagística da cobertura;
- Estudo dos efeitos das cores das fachadas;
- Paisagismo;
- Sistemas de resfriamento passivo;
- Efeitos da massa edificada.

⁴ Síndrome do edifício doente é um conjunto de doenças causadas ou estimuladas pela poluição do ar em espaços fechados.

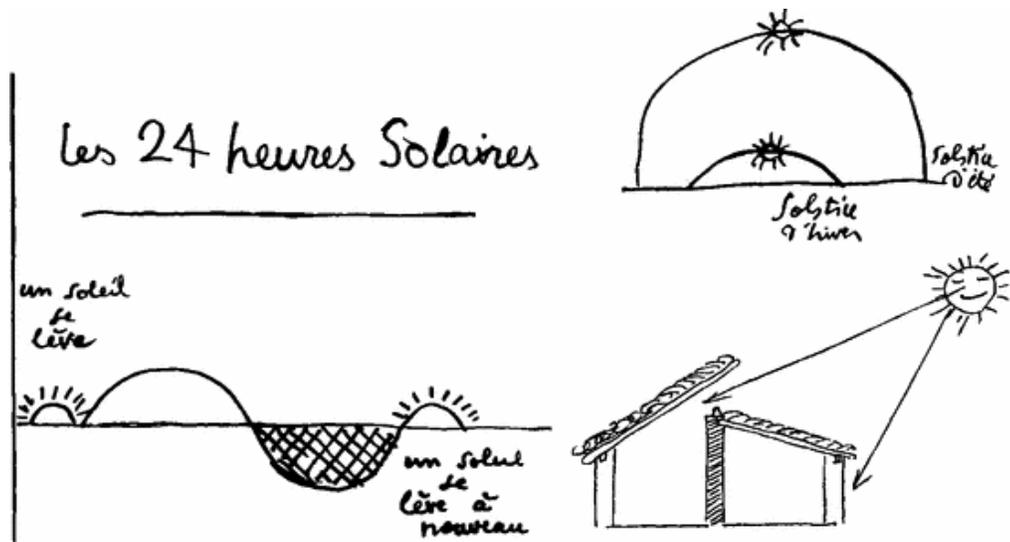


Imagem 8. Croqui de Le Corbusier, estudos solares, 1964.

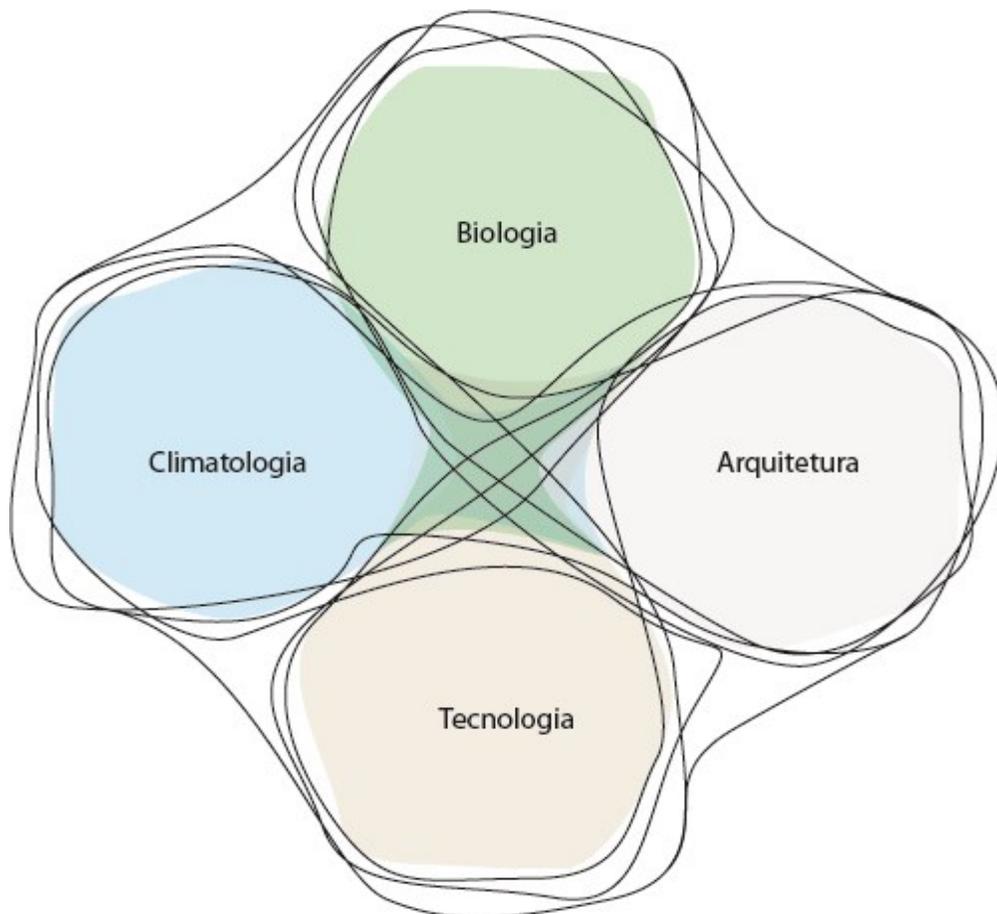


Imagem 9. Diagrama de Olgay. Fonte: Adaptado e traduzido pela autora a partir de Olgay e Olgay (1963).

A relação da radiação solar com as superfícies da construção é importante na compreensão do desempenho do edifício e sua correlação com o consumo de energia. A relação é direta. Quando o clima já é quente, quanto mais radiação/calor adentra a edificação mais quente ela fica e conseqüentemente, mais dependente de sistemas artificiais para gerar conforto.

Pode-se dizer, que há dois grupos elementos arquitetônicos com interações distintas com a radiação solar. O primeiro grupo são os elementos translúcidos. Estes permitem que parte da radiação direta do sol atravesse para o interior do edifício. Esse fenômeno colabora com aquecimento das superfícies internas e converte parte dessa radiação direta em calor sensível no interior do ambiente. Que por sua vez, não consegue mais atravessar o vidro (o vidro é opaco a radiação de onda longa), provocando um efeito estufa. O segundo são os elementos opacos. Estes não permitem que a radiação direta atravesse, mas podem aquecer e emitir o calor sensível para o interior do edifício (imagem 10). Lechner (2014) aborda que há quatro tipos de interações com a radiação do sol:

- Transmissão – a situação em que a radiação direta atravessa o material.
- Absorção – a situação em que a radiação é convertida em calor sensível no material.
- Reflexão – a situação em que a radiação é refletida na superfície.
- Emissão – é a situação em o material passa a emitir calor. A Norma NBR 15220, conceitua emitância como sendo a taxa de radiação emitida em um material por unidade de área (NBR, 2005a). Metal polido tem baixa emitância, muito dos demais materiais tem alta emitância.

Para dimensionar as estratégias em um projeto, se faz necessário o estudo do clima (radiação, temperaturas, ventilação, umidade), da geometria solar e da configuração urbana para associa-los a estratégias de projeto e a escolha dos materiais e pavimentos (OLGYAY e OLGAYAY, 1963). Em geral, quando realizados, esses estudos priorizam questões de desempenho do edifício e de seu interior e muitas vezes renuncia a questões externas, como o impacto urbano causado pela implementação do edifício e dos seus revestimentos.

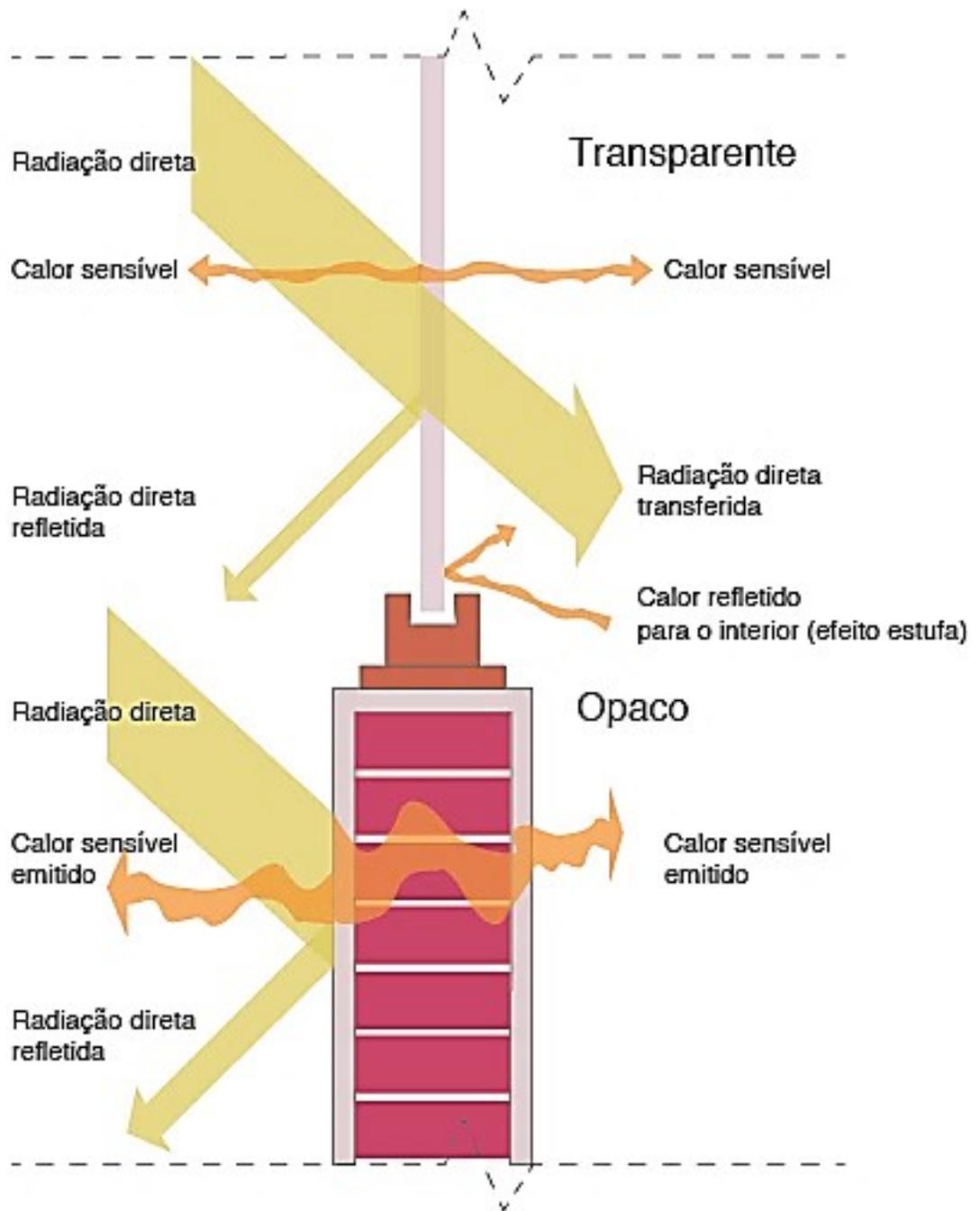


Imagem 10. Elementos arquitetônicos e interações com a radiação solar. Fonte: adaptado pela autora a partir de Lamberts *et al.* (2004) e Lechner (2014)

1.2.4 Metodologia de projeto em Biomimética

A Biomimética atualmente, ainda, não possui uma metodologia concretizada devido à dificuldade na tradução dos sistemas biológicos para o âmbito tecnológico (GRUBER, 2011). Em vez disso, verificam-se estudos que buscam inserir a abordagem na área de projeto. A biomimética é um campo de trabalho que envolve abordagens transdisciplinares. Sendo que, para que se obtenha resultados concretos, deve se assegurar uma comunicação adequada entre as diversas áreas envolvidas.

O *Biomimicry Institute 3.8* (2011) têm desenvolvido propostas para sistematizar processos biomiméticos do meio natural. As abordagens têm sido indicadas como meio para aplicar os conceitos inspirados nos “princípios da vida” em metodologias com processos cíclicos. Como exemplo desta abordagem, há uma metodologia denominada como “*Biomimicry Thinking*” que apresenta as lentes do projeto biomimético. Eles fornecem o contexto para onde seguir (tomadas de decisões), como, o quê, e porque a biomimética se encaixa no processo de qualquer disciplina ou em qualquer escala de projeto de design ou de arquitetura (BIOMIMICRY3.8, 2011b).

A metodologia busca ser uma estrutura para auxiliar projetistas a praticar a biomimética ao projetar qualquer coisa. Primeiro, a metodologia aborda três princípios, intitulados de “**elementos essenciais**”. Segundo, apresenta “**quatro etapas**” que colaboram com a organização do projeto, são elas: a definição do problema e escopo; descoberta da solução; emulação; e por último, avaliação. Sendo que, cada etapa se desdobra em vários passos, que podem se dar de forma ordenada ou aleatória conforme projeto.

1.2.4.1 Elementos essenciais

Os elementos essenciais servem como princípio éticos do projeto. Tratam dos princípios básico do design em biomimética:

- **Ethos** é uma representação do respeito, responsabilidade e gratidão do homem pelo planeta.
- **(Re)Conexão** indica que somos parte da natureza. Pessoas e natureza estão na verdade profundamente entrelaçadas. Nesta perspectiva, existe uma busca pela reconexão do humano com o meio natural a ser considerada em projeto. Um exemplo de projeto que aborda elementos de conexão pode ser visto nas imagens 11 e 12. Os espaços fazem alusão a elementos naturais através da exploração de plantas, luz natural e estratégias bioclimáticas.
- **Emulação** representa os princípios, padrões, estratégias e funções encontradas na natureza que podem inspirar o design. A emulação representa um sentimento que instiga a imitar ou a exceder outrem, de forma cooperativa (BIOMIMICRY3.8, 2011b). Um exemplo de proposta que utiliza estratégias de emulação como princípio, pode ser visto na imagem 13. O projeto visa emular o processo de suor da pele para elaborar envoltórias que são capazes de resfriar os ambientes internos através de recursos passivos de energia.



Imagem 11 e 12 Projeto do Herzog & de Meuron para o Miami Art Museum que explora conexões entre arquitetura, clima e elementos naturais. O projeto exemplifica potenciais de reconexão.



Imagem 13 *Hydroceramic skin*. Material produzido no *Institute for Advanced Architecture of Catalonia em Barcelona*. Intenciona reproduzir um sistema de resfriamento passivo mais eficiente para envoltórias. Utiliza princípios de emulação da transpiração, semelhantes ao que ocorre com o suor da pele. Fonte: Rathee *et al.* (2014)

1.2.4.2 As quatro etapas

A metodologia apresenta quatro etapas de projeto. Cada etapa é subdividida em passos. Os passos específicos dentro de cada etapa de projeto ajudariam a garantir a integração bem sucedida das estratégias de projeto (tabela 4). A ordem de execução dos passos pode ser ordeira conforme proposta, ou aleatória. A metodologia não é linear, a intenção é que haja loops constantes de maturação. As imagens 14 e 15 mostram o gráfico cíclico, que pode ser usado de duas maneiras, definidas como: “Desafio de biologia” e “Biologia para design”.

Tabela 4. Etapas e passos propostos para o *Biomimicry group 3.8*.

Etapa	Passos
Escopo	Definir contexto
	Identificar função
	Integrar princípios da vida
Descoberta da solução	Descobrir modelos naturais
	Abstrair estratégias biológicas
Criação	<i>Brainstorm</i>
	Emulação
Avaliação	Medição

No primeiro caso, desafio de biologia, as etapas podem ser seguidas em sentido horário: inicia-se com a identificação da problemática - procura-se uma solução inspirada na natureza – abstrai-se a ideia do conceito, - segue-se para fase de emulação – e finalmente, validação das hipóteses (imagem 14). No segundo caso, Biologia para design, o projetista pode ir de um campo a outro sem prender-se a uma sequência, sendo que o processo deve se dar de acordo com a necessidade, passando por todas as etapas. Por exemplo, quando se descobre algum princípio natural aleatório e visualiza-se uma aplicação daquele conceito para solucionar algum problema específico, seja de design, arquitetura, engenharia e diversos outros casos (imagem 15). É importante salientar, que o processo não é finalizado ao terminar a sequência. A intenção é de que o processo se repita visando a otimização continuada dos processos e soluções de projeto.

A imagem 16 exemplifica uma abordagem com princípios biomiméticos. Trata-se de um projeto que está sendo implementado no deserto do Saara e visa produzir alimentos e reverter o processo de desertificação das áreas adjacentes. Ele usa um processo cíclico, que se retroalimenta sem gerar resíduos. O projeto inicialmente se inspirou na carapaça de um besouro do deserto que é capaz de obter água do ar usando recursos passivos. O sistema gerado neste projeto usa o sol como fonte de energia e água do mar como recurso adicional. O sistema é capaz de produzir água doce para produção de alimentos e para ser usado no reflorestamento de áreas em processos de desertificação. O único dejetos obtido no processo final é o sal, que pode ser utilizado como matéria prima em outras indústrias (PAWLYN, 201_).

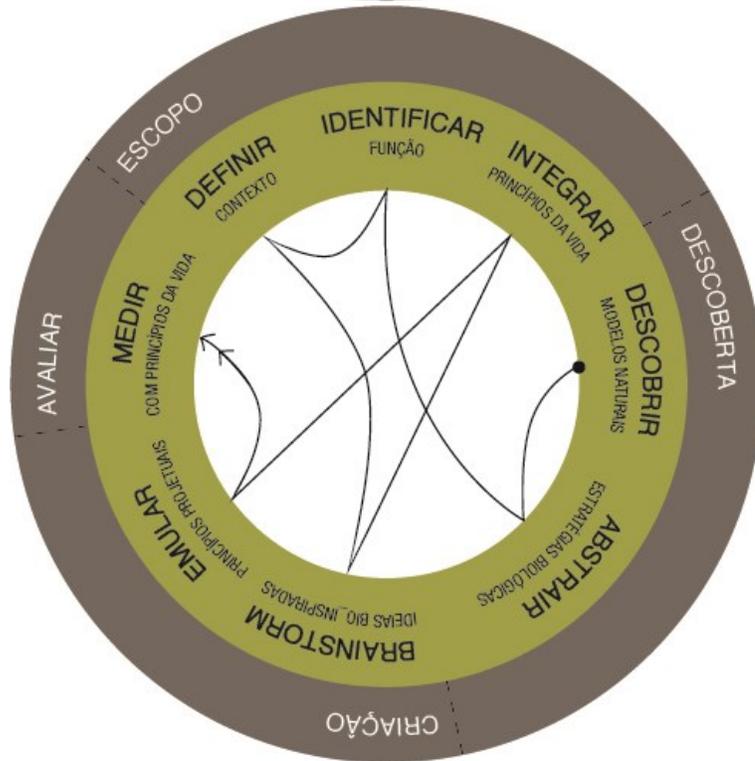
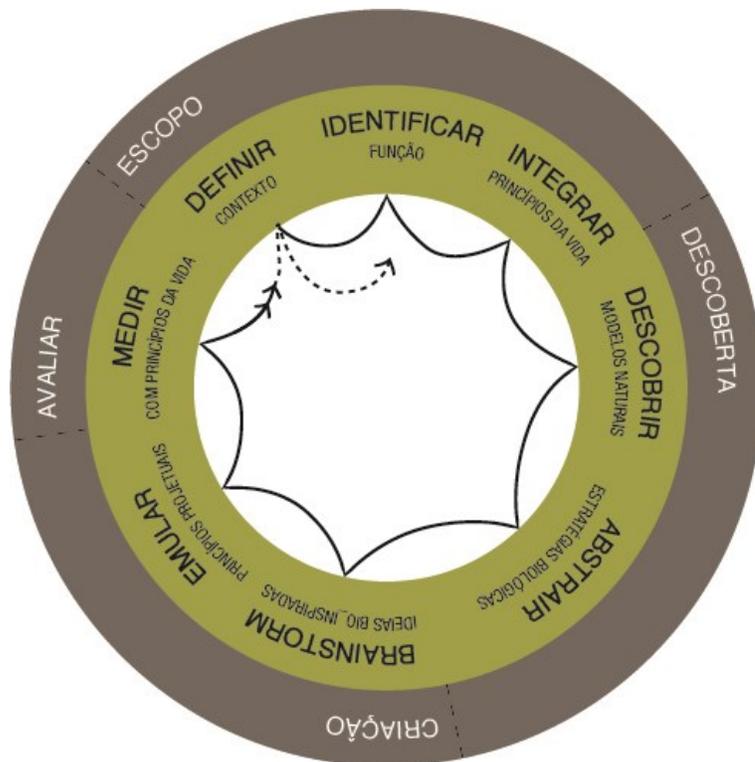


Imagem 14 e 15. *Biomimicry Thinking* – De cima para baixo; Desafio de biologia / Biologia para Design. Fonte: adaptado de Biomimicry3.8 (2011a)



Imagem 16. Projeto Saara, que usa princípios biomiméticos. O projeto iniciou-se a partir do estudo da configuração da carapaça de um besouro que captura água do ar em desertos. A intenção do sistema gerado visa produção de alimentos e recuperação de áreas em processo de desertificação. Usa como recursos o sol e a água do mar. É realizado um processo de dessalinização da água, que uma vez doce, é utilizada para agricultura orgânica e alimentação da área de solo adjacente, revertendo o processo de desertificação das áreas adjacentes. O sal produzido é usado para produção de blocos na construção civil. O projeto gera um sistema que não produz resíduos, usa energia renovável e gera uma economia cíclica. Fonte: Pawlyn (201_).

1.2.5 Forma em simbiose com desempenho

Oxman (2010) também apresenta um modelo para identificar um projeto com inspiração na natureza. Segundo a autora, os artefatos humanos necessariamente não são sustentáveis. Atualmente este título é cunhado por projetos que buscam pela redução da emissão de gás carbônico na atmosfera. Porém, sustentabilidade significa uma relação de simbiose entre objetos artificiais e naturais. O homem está longe de chegar a esse nível, sendo a proposta ir diminuindo essa distância, até um ponto que os processos e artefatos tornem-se mais integrados ao meio (OXMAN, 2010).

Oxman (2010) identifica meios para atrelar a forma com questões de desempenho. As suas explorações usam lógicas da natureza para criação de artefatos otimizados segundo desempenho pretendido inicialmente em projeto. Segundo a autora o processo de criação da natureza é integrado ao material e forma aplicados. Determinado ser vivo tem densidade óssea, forma, camadas de tecido, etc para responder de forma eficiente ao seu meio natural. Segundo essa lógica, ela propõe que artefatos humanos considerem modelos integrados de modelagem, análise e fabricação em design:

“Se nós assumimos que o jeito da natureza é por definição, sustentável, e se nós temos provas (...) de que na natureza não existe separação entre processos de modelagem, análise e fabricação, então tal desintegração pode ser eliminada e, refeita a partir de uma nova abordagem para projeto que suporte tal integração.” Oxman (2010)⁵; traduzido pela autora.

O trabalho apresenta um diagrama-modelo que guiou sua metodologia e apresenta uma definição sobre o que é desempenho (imagem 17). O diagrama ilustra como as várias motivações de projeto podem ser integrados através da busca pela performance. Considerações a partir do domínio da geometria, materialidade, fabricação, montagem lógica, comportamento e meio ambiente (com algumas sobreposições) são justapostas para dirigir o processo de geração da forma. O processo de design ideal, segundo Oxman (2010), indissocia a **modelagem**, **análise** e **fabricação** durante o processo de geração da forma, e deveriam ser vistos como interdependentes. As restrições inerentes aos processos devem ser reduzidas gradativamente a ponto de integrar estas três vertentes.

Em termos operacionais, a integração em seu trabalho é realizada a partir de modelos paramétricos que inclui simulações de desempenho e algoritmos que geram forma com base nos dados de desempenho e estratégias de montagem pretendidos. Apesar da conceituação apresentada em seu trabalho suas explorações ainda não exploram em plenitude essa abordagem. São fruto da integração do desempenho da estrutura, outras vezes ambientais, atrelado à escolha do material e a criação da forma (imagem 18). Apesar de utilizar modelos integrados para criar artefatos, segundo a autora, essa abordagem é apenas o início da busca por projetos sustentáveis, dentro de parâmetros bioinspirados.

⁵“If we assume that Nature’s Way is, by definition, sustainable, and if we have proven (...) that in Nature there exists no separation between processes modeling, analysis and fabrication, then such disintegration must be eliminated and, in turn, replaced by a new approach to design supporting procedural integration.”

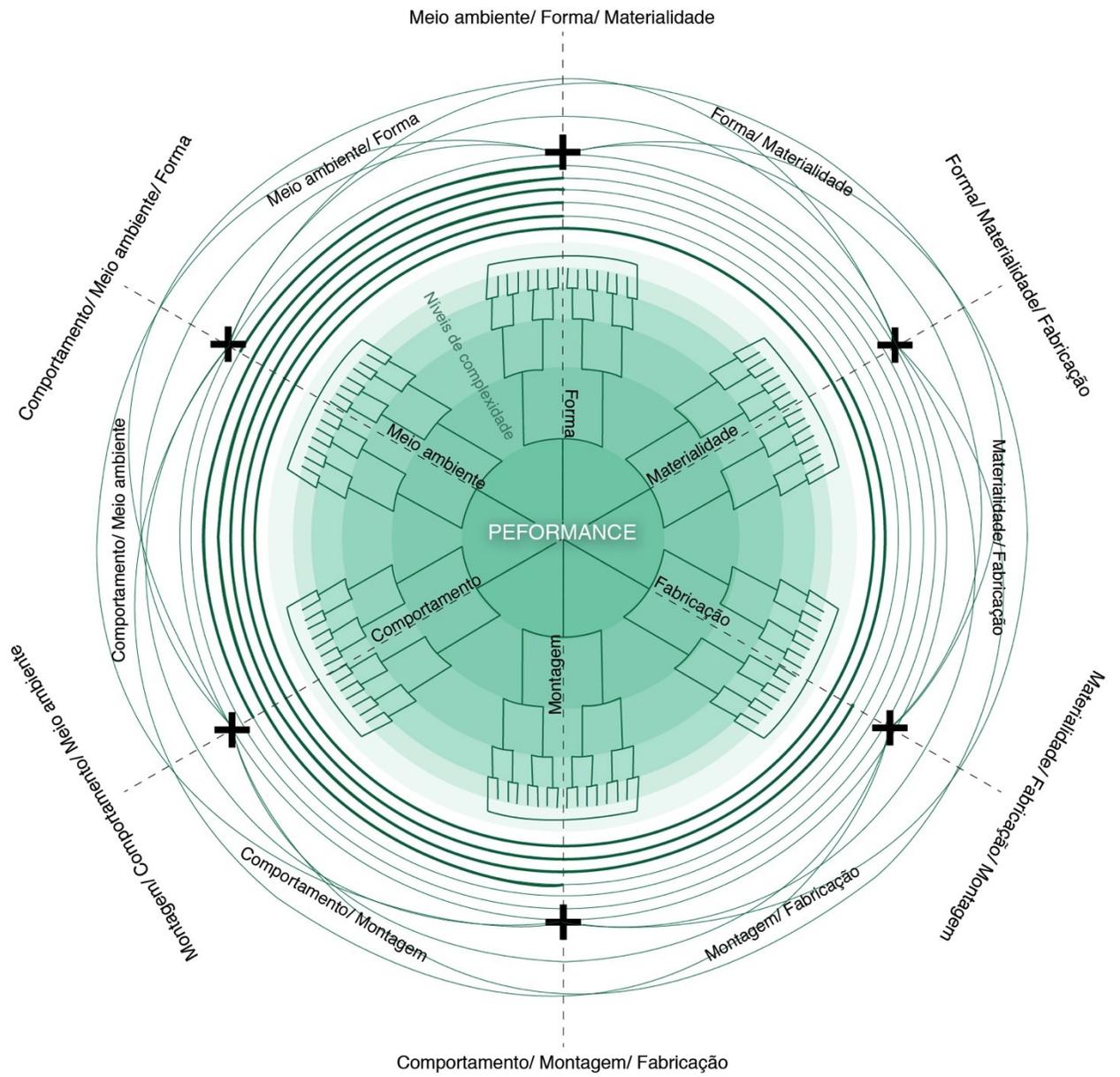


Imagem 17. Definição de performance. Fonte: Traduzido e adaptado pela autora a partir de Oxman (2010).



Imagem 18. Monocoque. Protótipo de uma pele com função estrutural, 2007, Museu de Arte Moderna de Nova York. Ilustra um processo de enrijecimento através de sua função estrutural baseado no algoritmo de voronoi. A simulação utiliza método de elementos finitos. Fonte: Oxman (2010).

1.3 Considerações sobre o capítulo

As áreas mencionadas se inter-relacionam. A bioclimatologia também se integra a lógica da biomimética, porém, dentro da especificidade do estudo climático. Em geral, para ocorrer à integração entre homem-cidade e cidade-natureza é fundamental a compreensão da micro e macro escala que rodeia a edificação. Ou seja, compreender como funciona o edifício, a cidade, e também como funciona a natureza, e suas lógicas. O projetista também deve considerar que a presença de elementos naturais é mais do que uma necessidade física para a saúde das cidades, mas também uma necessidade neurofisiológica do homem. Nesse sentido, foi concluído que há princípios de projeto comum as áreas estudadas:

- Busca pela integração do espaço construído à coerência evolutiva do ecossistema em seus diferentes níveis;
- Viabilização da interação do homem com os recursos naturais básicos (ar limpo e luz natural), filtrando o que é maléfico;
- Reconexão do homem a diferentes formas de vida;
- Eficientização do desempenho geral do edifício considerando suas implicações em diferentes níveis de complexidade;
- Forma segue performance (diferente de forma segue função do modernismo).

2 Design paramétrico e algorítmico

Para definir Design paramétrico e algorítmico, será utilizado significações atribuídas por Leach (2014). Segundo o autor, *design* paramétrico atualmente, refere-se genericamente à utilização de software de modelagem paramétrica. Softwares paramétricos permitem ligar parâmetros numéricos e geométricos permitindo assim ajustes incrementais de uma peça que, em seguida, afeta todo modelo em cadeia. A diferença do design paramétrico para o processo tradicional de projeto, é que no design paramétrico as “partes do projeto” são inter-relacionadas e mudam juntas de forma coordenada. Essa conexão facilita mudanças, relações, adições e reparos no projeto, reduzindo retrabalho e facilitando possibilidades. *Design* Algorítmico por sua vez, refere-se especificamente ao uso de linguagens de *script* que permitem ao designer dar um passo além das limitações da interface do software, possibilitando modelar através da manipulação direta não da forma, mas do código.

Este capítulo está dividido em três partes. A primeira trata do pensamento associado ao *design* paramétrico e algorítmico (**O pensamento paramétrico e algorítmico**). A segunda trata de forma sucinta sobre os processos de fabricação e prototipagem associados ao *design* paramétrico (**Fabricação e prototipagem**). A terceira parte, assim como no capítulo anterior, apresenta conclusões da autora sobre o tema abordado e sua associação com o capítulo anterior.

2.1 O pensamento paramétrico e algorítmico

Design paramétrico implica na utilização de parâmetros para definir uma forma através de relações que geram esta forma (MONEDERO, 2000). Design paramétrico, historicamente, evoluiu a partir de modelos simples gerados a partir de scripts de computador que estabeleciam variações de *design*. Teve início nos anos 60. Roller (1991) aborda que no início da década de noventa os processos paramétricos de modelagem ainda apresentavam exemplares propensos a erros e retrabalho. O autor apresentou um trabalho que visava à criação de um método que reduzisse esses erros (ROLLER, 1991). O *design* paramétrico na Arquitetura vem se popularizando apenas a partir dos anos 2000 (WOODBURY, 2010a). Esta popularização está relacionada com o avanço das ferramentas, e principalmente dos computadores domésticos. A partir de então, com o desenvolvimento de tecnologias de modelagem paramétrica de edificações, os processos de integração de projetos passam a ter um veículo que habilita a sua implementação prática (EASTMAN, 2008). Ao explicar um processo paramétrico Monedero cita o seguinte:

“Uma linha, por exemplo, é uma entidade que se torna parte de um modelo de dois parâmetros, uma vez que o seu comprimento e a sua direção, são especificados. Um polígono é um conjunto de linhas unidas em seus vértices cujos parâmetros posição também devem ser especificado quando ele é criado” (MONEDERO, 2000). Traduzido pelo autor (imagem 19).

Há uma ascensão do Design Paramétrico e Algorítmico dentro da prática de arquitetura e no processo projetual internacionalmente. Uma grande vantagem dos processos paramétricos está no momento em que se deseja

modificá-lo, corrigi-lo ou fazer variações do modelo (MOTTA e MOTTA, 1999; MONEDERO, 2000; KOLAREVIC, 2003; BARRIOS HERNANDEZ, 2006; SILVA, 2010; WOODBURY, 2010b; a).

O ato do design paramétrico/algóritmico requer um pensamento rigoroso, a fim de construir uma estrutura geométrica lógica sofisticada, flexível para viabilizar variações. Segundo Barrios Hernandez (2006), o designer deve prever quais tipos de variações que ele quer explorar, a fim de determinar quais transformações o modelo paramétrico deve fazer. Segundo o autor, esta é uma tarefa difícil devido à natureza imprevisível do processo de projeto (BARRIOS HERNANDEZ, 2006). A ação de relacionar elementos no design paramétrico exige o pensamento claro sobre o tipo da relação desejada (MONEDERO, 2000), principalmente quando realizado por via de código (design algóritmico). Woodbury, 2010, indica seis habilidades que devem fazer parte de projetista que usa ferramentas paramétricas e algóritmicas, são elas:

1. capacidade de conceber o fluxo de dados;
2. capacidade de dividir e conectar partes lógicas;
3. capacidade de nomear essas partes;
4. capacidade de pensar com abstração;
5. capacidade de pensar matematicamente e finalmente;
6. capacidade de pensar algóritmicamente.

Um modelo paramétrico é uma representação computacional de um modelo construído com entidades geométricas, que possuem atributos (**propriedades**), que são fixos e outros que podem variar (BARRIOS HERNANDEZ, 2006). Os atributos variáveis são chamados de “**parâmetros**” e os atributos fixos são chamados de “**restrições**”. O projetista pode alterar os parâmetros do modelo paramétrico para procurar soluções alternativas diferentes para o problema em questão. O modelo paramétrico responde às mudanças, adaptando-se ou reconfigurando para o novo cenário, sem precisar apagar ou remodelar (BARRIOS HERNANDEZ, 2006). Nesse sentido, o processo paramétrico torna-se promissor se comparado aos modelos tradicionais. Essa vantagem tem relação direta às “restrições” aplicadas pelo projetista do modelo paramétrico. (MONEDERO, 2000). A noção de “restrições” apareceu em CAD em 1963, na obra de Sutherland: *Sketchpad a man-machine graphical communication system*, um programa precursor das ferramentas contemporâneas de CAD (SUTHERLAND, 1963; MONEDERO, 2000). Ao explicar restrições Monedero afirma:

“Como acontece com a própria noção de design paramétrico, a noção de restrição está presente, de forma básica, em qualquer sistema CAD. A polilinha, por exemplo, pode ser entendida como uma coleção de curvas com vértices restritos a permanecer solidários. Porém, em geral, a noção de restrição indica um modelo com uma base de dados estendida. A restrição é uma relação que limita o comportamento de uma entidade ou um grupo de entidades” (MONEDERO, 2000).

Hoffmann e Joan-Arinyo (2005) citam que há três abordagens de restrições para construção de um modelo paramétrico: gráfico, lógico e algébrico (HOFFMANN e JOAN-ARINYO, 2005). No primeiro, o gráfico, o problema de restrição é traduzido em um gráfico cujo os vértices representam os elementos geométricos e cujo os limites representam as restrições sobre eles. Na abordagem baseada em lógica, o problema se traduz em um conjunto de afirmações e axiomas que caracterizam as restrições e os objetos geométricos. Com o emprego de passos lógicos, as afirmações são transformadas em geometria. Finalmente, na abordagem algébrica, o problema de restrição é traduzido diretamente em um conjunto de equações não-lineares, sendo resolvido usando qualquer um dos métodos disponíveis para o tipo de equação.

Motta e Motta (1999) fazem uma associação entre o processo projetual e o processo auxiliado por computador. Os autores defendem que uma vez identificado, determinado processo projetual pode ser caracterizado como uma função, com variáveis que podem ser análogas as que encontramos no processo paramétrico. Esta função teria como dados de entrada: necessidades, desejos, restrições e blocos construtivos (parâmetros) (imagem 20). As interações produzem um artefato como resultado. Segundo os autores, no modo de configuração tradicional, o projetista muitas vezes, tem uma vaga ideia sobre como será o resultado final da combinação de variáveis do projeto em decorrência da complexidade (MOTTA e MOTTA, 1999). Portanto, sugerem que processos paramétricos servem como auxílio para computar soluções. Segundo os autores, processos projetuais poderiam torna-se *templates* passíveis de configuração e parametrização.

Somadas as ideias de que: determinados processos projetuais são passíveis de se transformarem em um processo paramétrico; de que, são crescentes, as demandas pela melhoria do desempenho das edificações; e de que houve uma evolução das ferramentas de modelagem e de predição de desempenho das edificações. Autores já discutem a associação de ferramentas de predição de desempenho utilizadas como parâmetros e restrições para criação e melhoria das formas dos elementos de arquitetura e de urbanismo (KOLAREVIC, 2003; HOLZER *et al.*, 2007; SILVA, 2010). O trabalho de Oxman (2010) abordado anteriormente, por exemplo, apresenta processos integrados para obter soluções de *design*. As suas explorações utilizam processos paramétricos através da manipulação direta do código - design algorítmico (utilizando visual basic) associado a uma ferramenta de modelagem 3D (Rhinoceros). Outros exemplos serão abordados a seguir, no item “Parametrização atrelada a simulações de desempenho”.

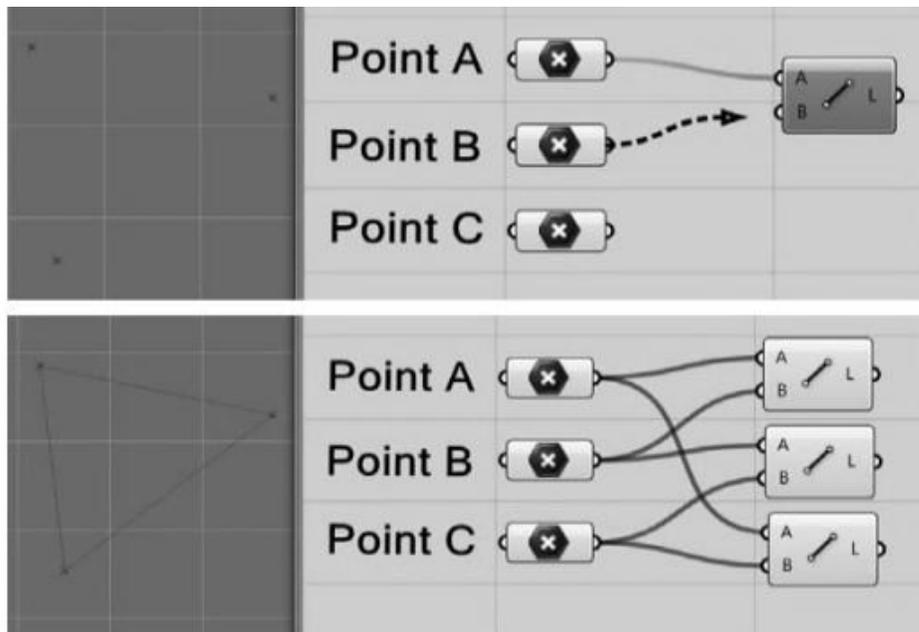


Imagem 19. Construção de uma linha e de um polígono no *Grasshopper* para *Rhinoceros 3D*.

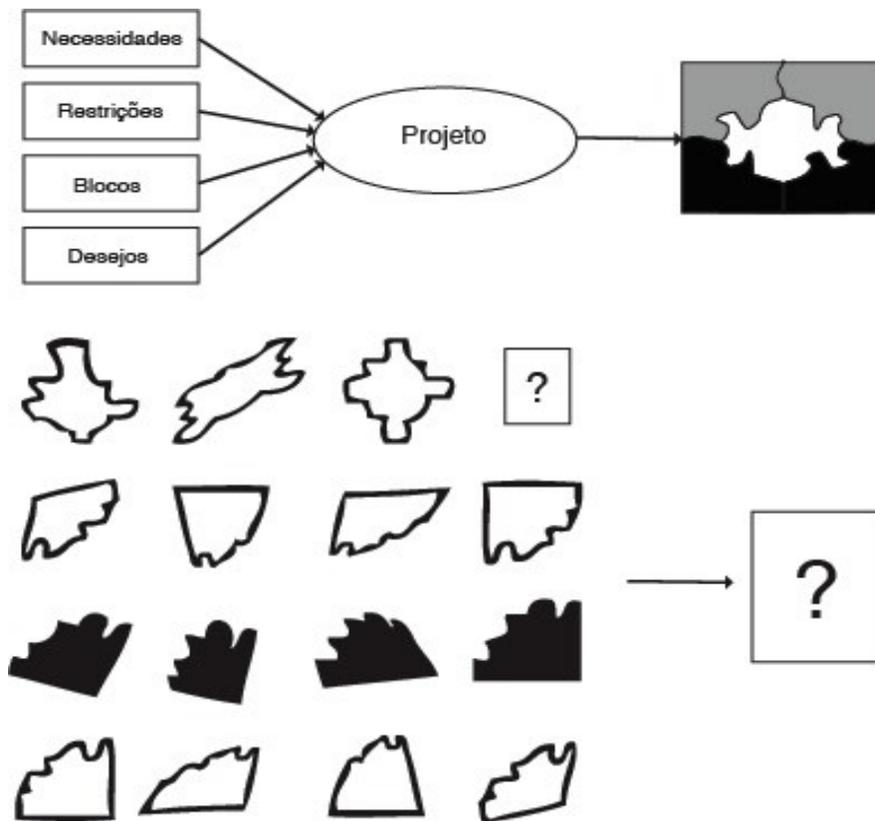


Imagem 20. Uma caracterização genérica de solução de projeto. Fonte: traduzido pela autora a partir de Motta e Motta (1999).

2.1.1 Parametrização vinculada a simulações para desempenho

Projeto guiado pela performance⁶ em arquitetura é definido pela exploração de simulações computacionais para modificar as formas geométricas em decorrência de um determinado objetivo. Segundo Fisher (2012) pesquisas nesta área buscam desenvolver processos que combinam diferentes abordagens integradas ao modelo e aspira soluções de design para um desenvolvimento sustentável. A arquitetura progride em direção do desenvolvimento das tecnologias de parametrização e fabricação digital, em concomitância, progride também com ferramentas de análise de desempenho. Softwares de análise da construção e de seu desempenho ajudam projetistas a avaliar seus produtos a partir de diferentes aspectos, desde o espaciais, sociais e culturais, como também, o puramente técnico (estrutural, térmicos, acústicos, etc) (KOLAREVIC, 2003).

Esses softwares permitem melhoria do edifício, otimização de seu desempenho e colaboram com a racionalização da sua construção (KHABAZI, 2012). Porém a integração dessas ferramentas durante o processo projetual muitas vezes é deficiente. Principalmente durante as primeiras fases de projeto. O projeto arquitetônico tende a integrar critérios de performance e dados quantitativos somente em fases relativamente avançadas do processo projetual, e isso compromete a incorporação dessas estratégias (TURRIN *et al.*, 2011; LIMA, 2012; RORIZ, 2012).

Alguns softwares de análise de desempenho com enfoque paramétrico para prover integração, vem despontando. Nesses softwares os resultados das análises podem ser utilizados para gerar e otimizar formas. Ou seja, tornam-se parâmetros de modelagem. Nesses casos, não é apenas a facilidade em modificar modelos ou a facilidade em gerar formas complexas que inclinam projetistas a processos paramétricos. Além dessas buscas, projetistas estão interessados na geração de formas otimizadas. Eles buscam desfocar as distinções entre geometria e análise, entre aparência e desempenho (KOLAREVIC, 2003; KHABAZI, 2012). Esta oportunidade de integrar plenamente simulação no processo de design, provoca uma transição de um processo, que era tradicionalmente de "tomada de forma" para um processo que é uma combinação de "tomada de forma" e de "descoberta da forma".

A partir de técnicas paramétricas, o arquiteto passa a ter meios para um maior controle sobre processos eficientes se comparado com abordagens padrões, e também facilita novas maneiras de coordenar processos integrados de construção e fabricação (LEACH, 2014). Segundo Delanda (2009) é uma questão de não olhar para a forma em si, mas para os processos de tomada de decisões que levam à geração da forma (LEACH, 2009). Discussões sobre integração na indústria AEC tem o potencial de ampliar o escopo de transformações com o advento das tecnologias de fabricação digital. Fabricação digital considera inerentemente, processos integrados de projeto e fabricação auxiliado/controlado por computador visando à aceleração da produção de componentes ou sistemas (Schodek, 2005).

As abordagens paramétrica e algorítmica possibilitam associação do modelo 3D a outros parâmetros, por isso é importante a clareza do projetista/programador quanto ao processo desejado. É possível associar análises ambientais, climáticas e adição de restrições referentes à sustentabilidade. Dessa forma, o processo passa a ser automatizado e criam-se modelos otimizados a partir destas restrições. Dois exemplos de pesquisas neste contexto são exemplificados a seguir:

Turrin *et al.* (2011) descrevem processo que utiliza design paramétrico e generativo para interligar soluções entre forma e desempenho. Os autores apresentam mecanismos para a integração de desempenho associando

⁶ *Performance based design*

modelagem paramétrica, algoritmos genéticos⁷ e simulação de desempenho. Os exemplos dados abordam questões estruturais e bioclimáticas para um projeto de uma cobertura. O ponto chave do trabalho é discutir a forma orientada pela performance pretendida do projeto.

Uma vez estabelecido o processo algorítmico, a parametrização permite gerar uma diversidade de soluções segundo configurações estabelecidas pelo projetista. Os critérios e as simulações, nesse caso, são inseridos no processo projetual já na fase de concepção através de uma malha de dados usando o software Paragen. Sendo que, a forma gerada pelos processos genéticos estão relacionadas à caracterização da performance. O trabalho discute a relevância deste tipo de exploração no contexto das discussões de complexidade em projeto e a possibilidade de aplicações interdisciplinares. Neste caso em especial, as abordagens são de cunho estrutural e bioclimático (imagens 21, 22, 23 e 24).

O trabalho de Taleb e Musleh (2015) apresenta um estudo realizado no *Grasshopper* que traz a investigação do potencial de aplicação de processos de otimização de desenho paramétrico/algorítmico sobre os processos de design urbanos convencionais. A metodologia adotada utilizou ferramentas como *Grasshopper* associada a uma ferramenta de CFD, o ANSYS CFX, para alcançar respostas integradas e otimizadas climaticamente.

O trabalho usa como estudo de caso a área urbana de Dubai. Semelhante ao caso anterior, o trabalho integra simulações e as utiliza como restrições de *design* na fase de concepção aplicados ao espaço urbano. Os fatores abordados para criar recomendações de sustentabilidade na escala urbana no trabalho foram: a radiação solar, a ventilação urbana, a forma dos edifícios, a orientação. Taleb e Musleh (2015) consideram que a adoção de simulação no processo projetual é fundamental no projeto em sustentabilidade principalmente para prever o desempenho e estabelecer indicadores. Os resultados indicam ganhos nos indicadores de até 30%. O autor acredita que essa abordagem tem potencial para colaborar com o projeto de cidades mais sustentáveis em um futuro próximo (imagens 25 e 26).

Tizani e Mawdesley (2011) também identificam esta corrente como avanço e inovação dentro da área de computação aplicada à construção civil. Segundo os autores, a integração de conhecimentos multidisciplinares em um único modelo paramétrico é um dos aspectos identificados como sendo de importância, pois facilita processos interdisciplinares e criação de modelos inteligentes. Segundo Shi e Yang (2013), a metodologia convencional de projeto em arquitetura não é totalmente eficaz na busca da relação entre projeto (forma) e performance, sendo necessário desenvolver e aperfeiçoar o processo de projeto baseado na análise de desempenho de maneira mais científica e integrada.

⁷ É uma técnica utilizada na ciência da computação para otimização e busca de soluções a problemas, fundamentado em modelos evolutivos implementados como uma simulação que busca a combinação ideal das variáveis de um modelo paramétrico.

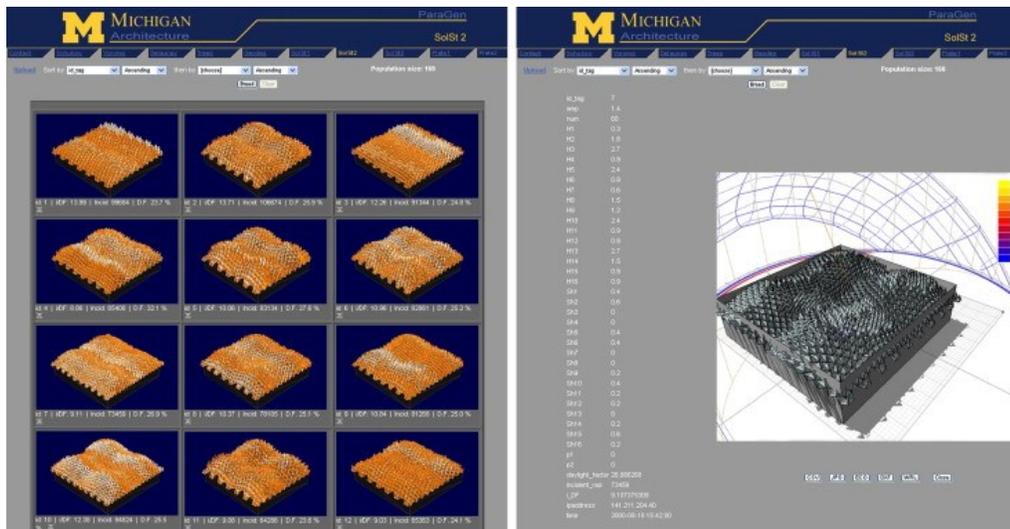
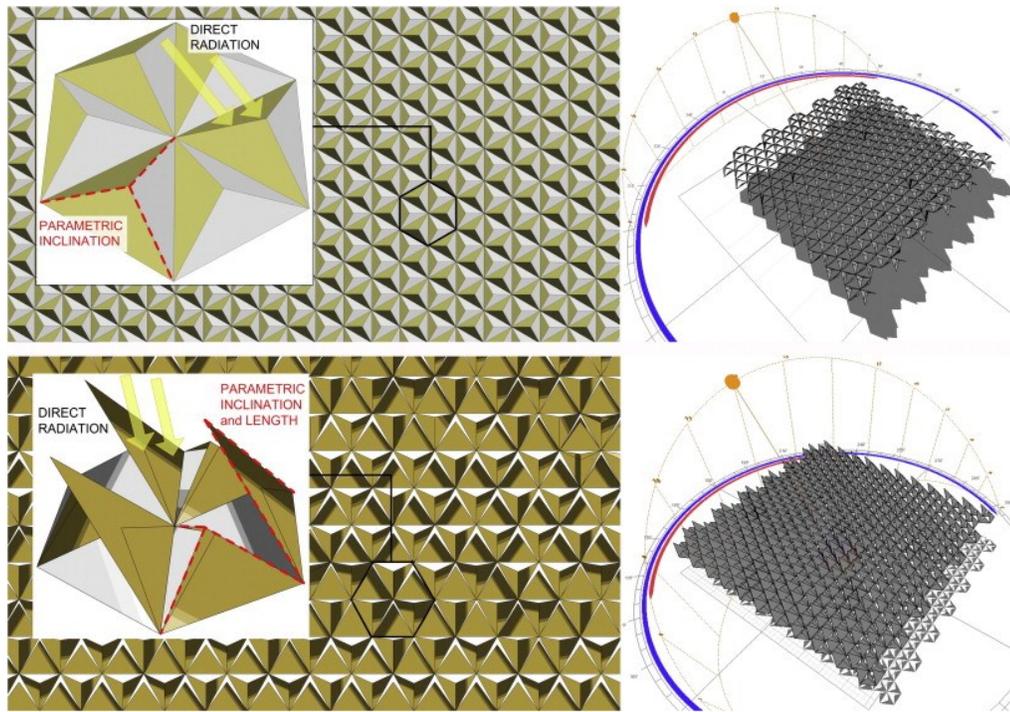


Imagem 21, 22. Elemento de sombra elaborado com ajuda de parametrização da forma e integradas a análise de desempenho. Fonte: Turrin *et al.* (2011).

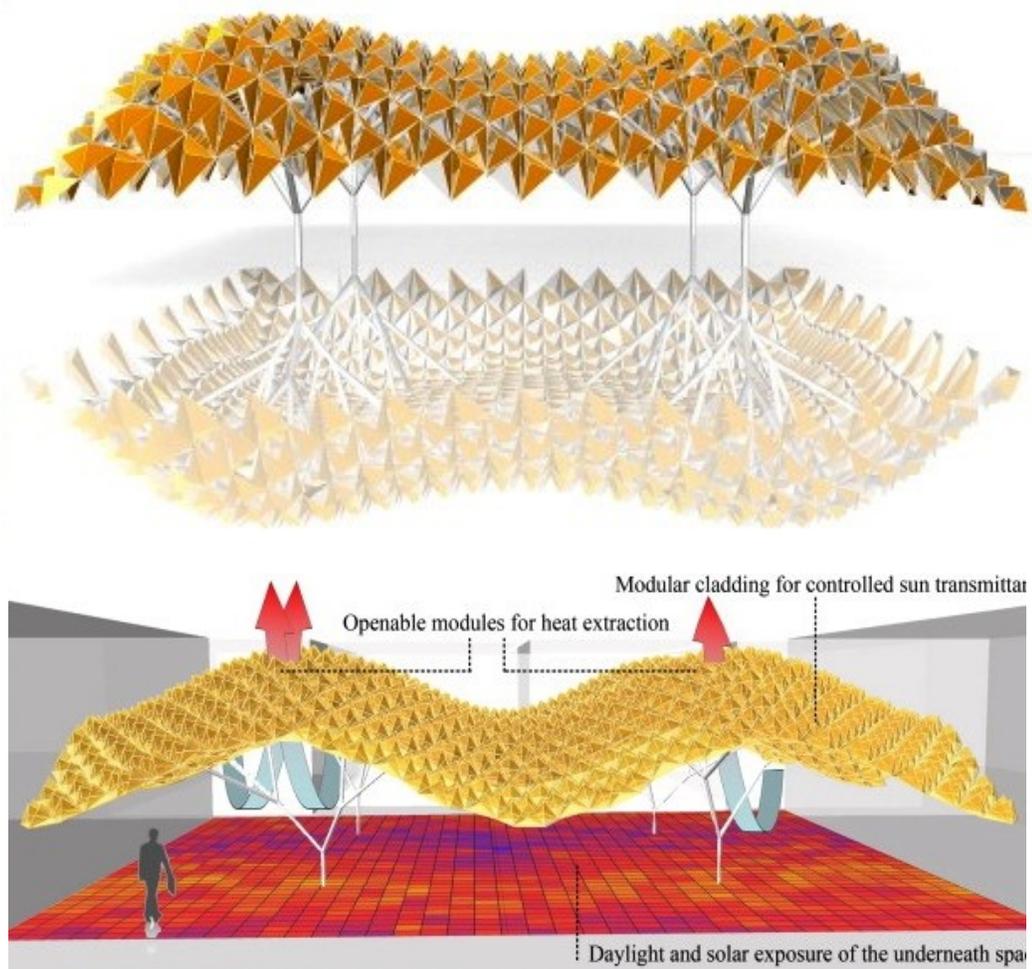


Imagem 23, 24. Elemento de sombra elaborado com ajuda de parametrização da forma e ferramenta de análise de desempenho. Fonte: Turrin *et al.* (2011).

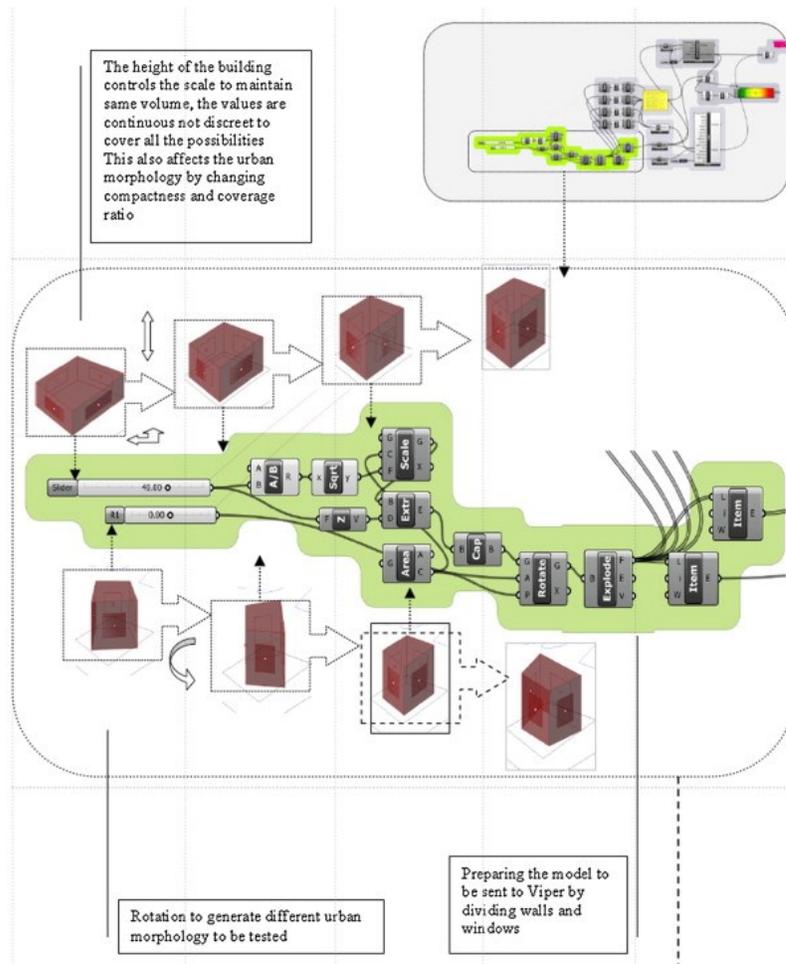
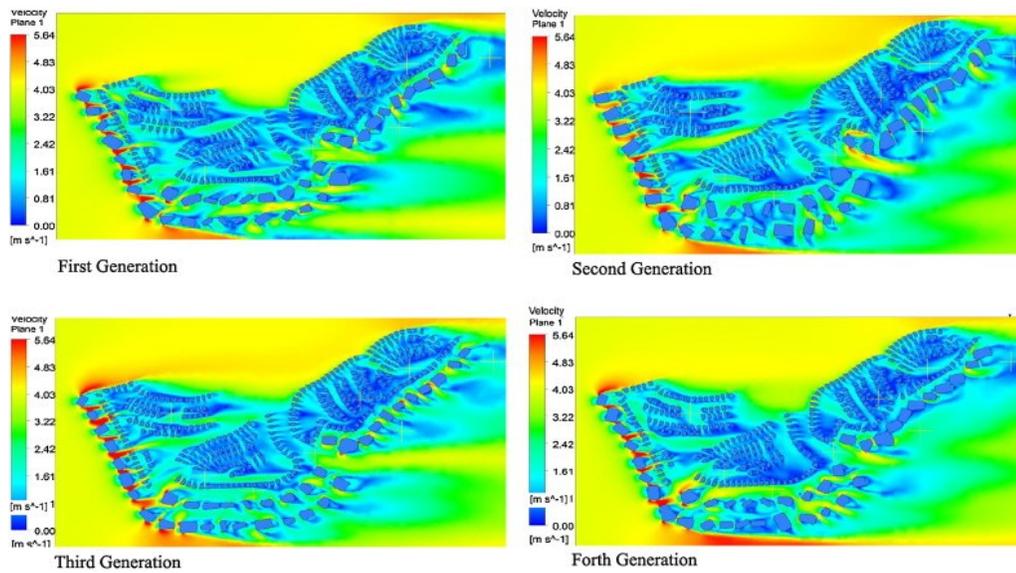


Imagem 25, 26. Uso de CFD aplicado ao modelo paramétrico para gerar recomendações urbanas. Fonte: Taleb e Musleh (2015)

2.1.2 Scripting gráfico

Scripting gráfico permite criar programas, concatenando elementos gráficos e não necessariamente usando linguagem de código de texto. Quando esse tipo de programação é aplicada gera um modelo visual de fluxo de dados. Esse tipo de abordagem associado a um programa de modelagem vem se tornando popular internacionalmente entre projetistas, porque permitem a criação de processos variados e integrados conforme interesse projetual.

A vantagem dessa abordagem é a possibilidade de executar algo semelhante a alguns ambientes algorítmicos de modelagem sem necessidade de usar código no texto. Em vez de apresentar uma interface para escrever linhas em um compilador, esses programas contêm uma área de trabalho onde se insere os componentes que comporão o "código" para realizar uma determinada tarefa (Celani e Vaz, 2012).

O modelo visual do fluxo dos dados é demonstrado com base em nós e links. Os nós são funções computacionais que escabecem determinada ação. A função de cada nó pode requerer uma entrada de dados e produzir dados de saída. Em geral os nós requerem input e outputs. Um nó pode ser input de outro nó, sendo ligados através de links. Todo o processo gera um diagrama que mostra o sistema de fluxo de dados gerados (Janssen e Wee, 2011). Cria-se "árvores" de ícones, que geram um modelo ou comportamento específico. Leach (2014) descreve como ferramentas de "*scripting* gráfico" (imagem 27). Quatro exemplos deste tipo de software são: *Generative Components* (GC) da Bentley, *Grasshopper* (*software* livre), Sidefx Houdini da Side Effects *Software* e o Dynamo da Autodesk (em teste pela empresa).

No momento da escrita deste trabalho, o *Grasshopper* é um dos mais populares. Trata-se de um *plugin* gratuito, que funciona como editor algorítmico gráfico integrado a ferramenta de modelagem do *Rhinoceros* 3D. A ferramenta permite exploração de algoritmos generativos. O precursor do *Grasshopper* teve sua primeira versão elaborada em 2008 por David Rutten (PAYNE e ISSA, 2009). A despeito de ter uma abordagem algorítmica, ela não necessariamente requer conhecimento de programação, apesar de também permitir a construção de geradores de função a partir de programação textual.

Em decorrência da sua versatilidade, uma série de projetistas vem desenvolvendo trabalhos que integram o *Grasshopper* a ferramentas de simulações para predição de desempenho do edifício. Junto aos trabalhos, uma série de plug-ins que visam criação de modelos integrados. Seja em termos estruturais, bioclimáticos, etc. Esses plug-ins permitem elaborar simulações em um único modelo paramétrico, possibilitando a integração inovadora entre projeto e criação de soluções eficientes. A imagem 28 mostra o DIVA, ferramenta integrada ao *Grasshopper* que usa simuladores como o Daysim e o *Energy plus* para realizar simulações.

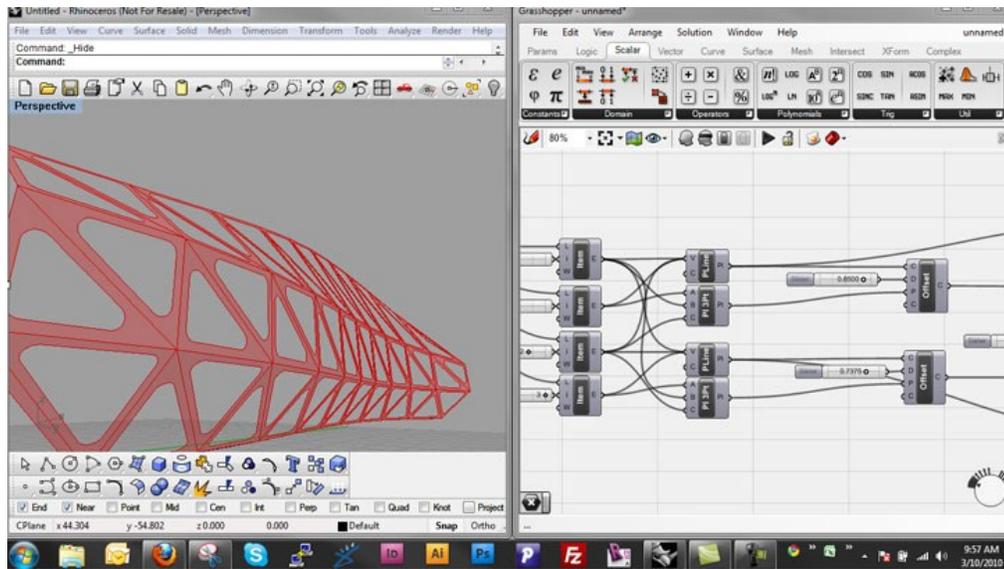


Imagem 27. Interface do Grasshopper e seu “script gráfico”.

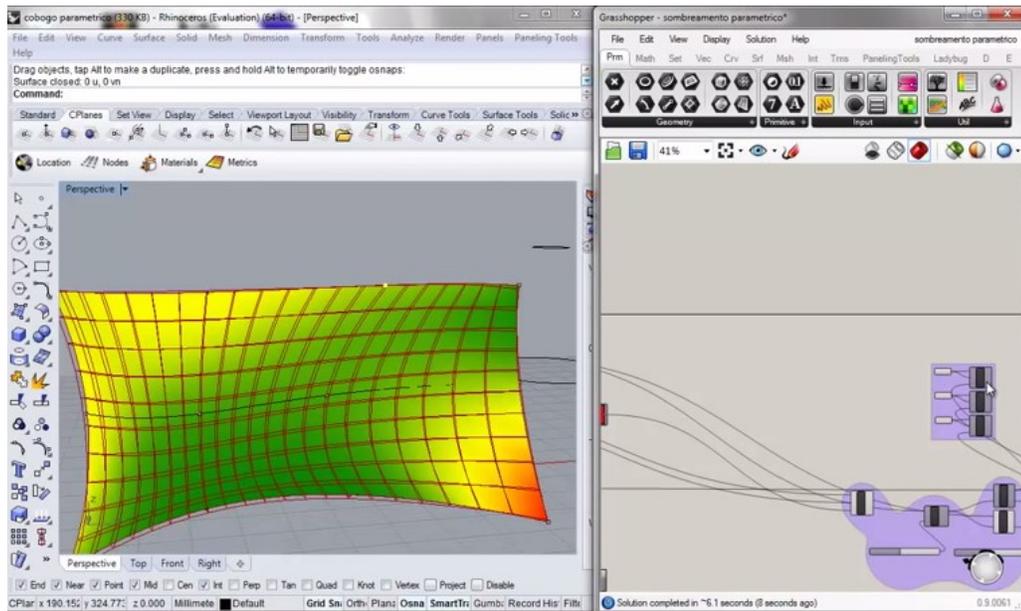


Imagem 28 A interface do Diva é integrada a do Grasshopper, a imagem mostra simulação ocorrendo durante modelagem de uma superfície.

2.2 Fabricação e prototipagem com aporte de ferramentas Digitais

O termo Fabricação digital atualmente vem sendo utilizado genericamente para descrever o uso de ferramentas numericamente controladas por computador usadas para fabricar ou prototipar objetos, peças e sistemas. Porém, entende-se que fabricação é o estágio de produção em que, uma vez realizado, o produto gerado pode ser utilizado pelo usuário alvo seguindo sua finalidade. Prototipagem, por sua vez, trata da fase de produção em que o produto está em teste e não necessariamente é realizada para uso, mas sim, para estudo do projeto (CELANI e PUPO, 2008). Ambas as etapas podem fazer uso de ferramentas controladas por computador. Em documentos acadêmicos, quando ferramentas digitais são utilizadas durante a fase de prototipagem recebem o termo de “prototipagem rápida” (*rapid prototyping*) e quando utilizadas para fabricação, o termo de “manufatura rápida” (*rapid manufacturing*) (PUPO, 2008).

A primeira vez que testaram uma máquina numericamente controlada por computador data da década de 50, foi realizado no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) (SCHODEK, 2005). Desde então, se percebeu que permitia cortar e construir peças potencialmente mais complexas do que as feitas a mão. Com o tempo, as tecnologias de máquina numericamente controladas por computador foram se diversificando. Já é possível cortar peças com jato de água, com fresa ou laser e imprimir objetos em 3 dimensões. Atualmente, fabricação digital está atingindo um público cada vez maior, e vem se popularizando sob formatos domésticos de "fabricação pessoal".

No contexto de arquitetura, a fabricação digital tem potencial de reduzir o vão entre representação e o edifício (PUPO, 2008; IWAMOTO, 2013). É um meio que possibilita testar soluções e conexões físicas. Schodek (2005) cita em seu livro uma série de exemplos em que processos com aporte digital são utilizados para prototipar e estudar soluções arquitetônicas não usuais e também para o estudo de sistemas mecânicos e estruturais durante o projeto de diversos edifícios. Segundo o autor:

“No contexto da construção civil, os variados níveis de prática digital integrada podem continuar a oferecer oportunidades para fabricantes expandirem aplicações digitais para além de produtos com modelos paramétricos (...). O valor do diálogo com fabricação durante a fase de projeto pode ser oferecido através de uma base de dados incorporada a construção, e a assessoria em rede entre usuários e designers. Esse ambiente de tecnologia da informação e meio digital pode apoiar colaborações geograficamente distantes e pode ampliar ainda mais o diálogo por "trazer a fábrica para o estúdio" de design desde o início do projeto até o desenvolvimento do detalhe; ele também pode "trazer o estúdio para a fábrica" durante a fabricação e construção.” Schodek (2005). Traduzido pela autora.

Pupo, (2008) apresenta métodos de produção com aporte de ferramentas digitais para construção civil. Segundo a autora, a produção pode ser definida por três aspectos: a **maneira** em que é produzido, o **número de dimensões** da ferramenta utilizada, e à **finalidade** do objeto a ser produzido. A imagem 29 apresenta os três aspectos, seus desdobramentos e possíveis utilizações na área de arquitetura e construção civil.

O primeiro aspecto aborda a forma com que o objeto é produzido, podendo ser por adição, formação ou subtração. O segundo aspecto aborda a tecnologia das ferramentas em termos de dimensões, as quais podem trabalhar em 2D (ex: cortadoras de vinil), 2,5D (ex: fresadoras CNC comuns) e 3D (ex: algumas fresadoras CNC e impressoras 3D). O terceiro e último aspecto aborda qual será as aplicações, ou seja, se será um processo

destinado a fabricar ou prototipar o produto. As aplicações podem variar desde a produção de maquetes de estudo, até a construção de edifícios inteiros, passando pela elaboração de elementos construtivos, construídos e/ou enviados diretamente para a obra (PUPO, 2008).

Willis *et al.* (2011) comenta o surgimento de outro processo que intitula de “fabricação interativa” (*interactive fabrication*). Este se diferencia da fabricação digital por adicionar uma interface interativa incorporada ao processo de modelagem, ou seja, tecnologias que permitem o intercâmbio mais direto entre o homem e a produção controlada por computador. Um exemplo é o uso de realidade virtual para trabalhar no processo de modelagem (imagem 30).

Segundo Gershenfeld (2012), estamos entrando numa nova revolução digital, semelhante a que ocorreu na área de comunicação. Fabricação digital e os equipamentos de fabricação pessoal vão permitir que indivíduos projetem e produzam objetos tangíveis sob a demanda, onde e quando precisem. A velocidade do acesso a essas tecnologias podem modificar modelos de negócios, processos colaborativos e estratégias de educação. A popularização dessas tecnologias acendem questionamentos gerais. Elas vão desde questões relacionadas a direitos autorais quanto à divergência ou não com processos sustentáveis. Em relação ao último, por exemplo: popularizar a fabricação seria uma grande fonte de resíduos adicionais, ou um meio mais sustentável de produção?

A última questão é abordada por Mota (2011). O autor debate que tecnologias de prototipagem por processos aditivos não desperdiçam quase nenhum material e podem dispensar moldes. A capacidade de facilmente reparar e redirecionar objetos pode melhorar problemas relacionados à obsolescência programada dos objetos. A capacidade de ter algo fabricado somente quando e onde for necessário também diminuiria consideravelmente o consumo de combustível, a poluição e o desperdício excedente associados à indústria. Por outro lado, a facilidade de produzir coisas em determinados casos pode significativamente aumentar a quantidade de resíduos, principalmente com a possibilidade de se obter modelos online. Ou seja, uma série de questionamentos se acendem e devem ser discutidos com a popularização dessas ferramentas.

A seguir será discutido sucintamente técnicas de produção em fabricação digital. O grupo de técnicas foi selecionado conforme proposição de Iwamoto (2013), são elas: seccionamento, tesselação, planificação (ou desdobramento), utilização de contornos e formação.

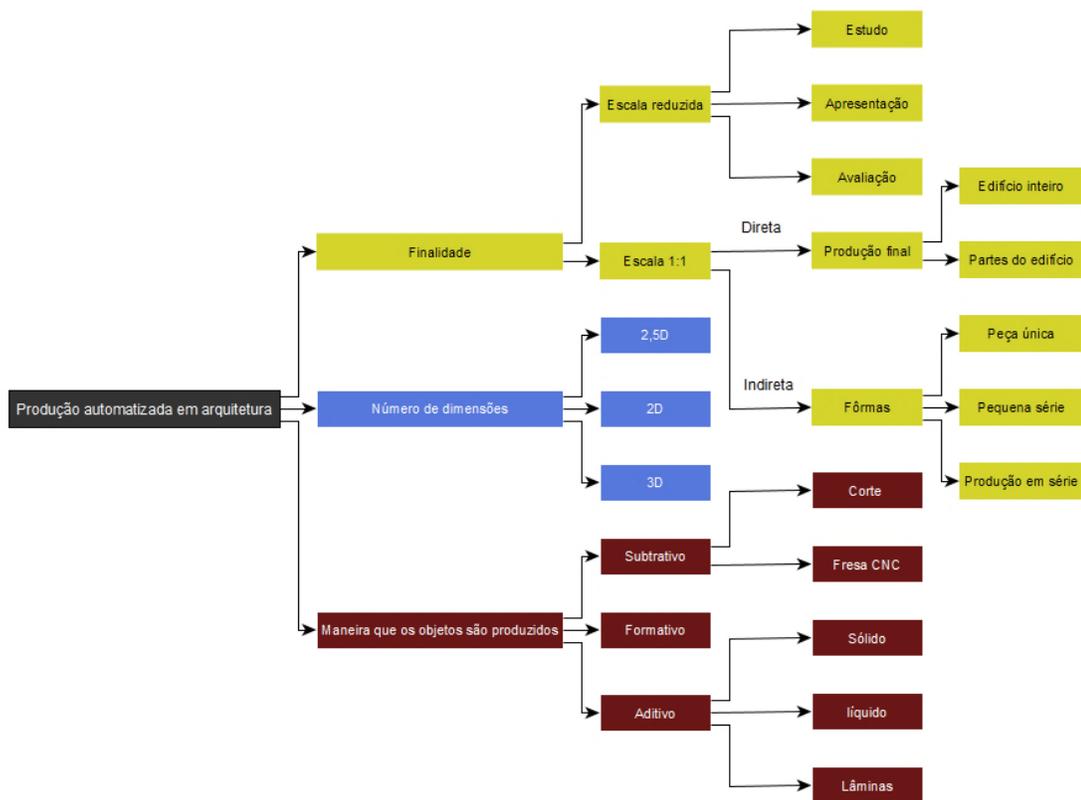


Imagem 29. Métodos de produção automatizada em arquitetura e construção. Adaptado pela autora a partir de Pupo, (2008).

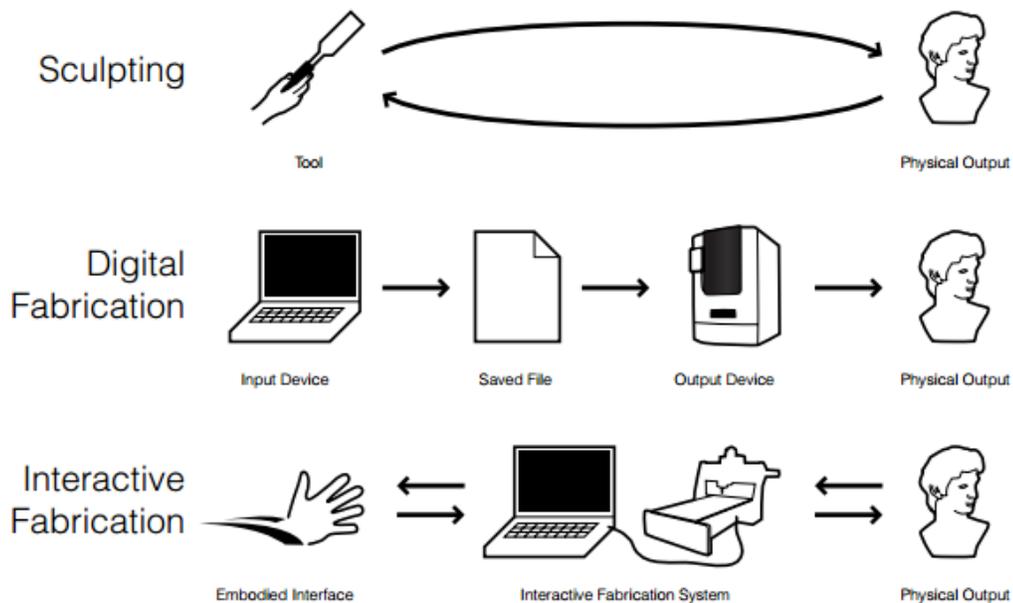


Imagem 30. Diferença entre processos diretos, fabricação digital e fabricação interativa. Fonte: Willis *et al.* (2011)

2.2.1 Seccionamento

A técnica consiste em seccionar o objeto em projeções ortogonais de duas dimensões. Os planos são cortados e utilizados para materializar o objeto desejado. A técnica historicamente é utilizada desde a era pré-digital, principalmente para produzir formas escultóricas em concreto. Ferramentas digitais facilitaram a técnica, já que alguns softwares 3D podem realizar seções quase instantaneamente (IWAMOTO, 2013). Também existem algoritmos que ajudam a organizar as seções e otimizar placas de corte, e assim, reduzir resíduos. A estética característica desta técnica é geometrias definidas por planos, em geral, estabelecidos através de coordenadas cartesianas (Imagens 31 e 32). Esses planos podem ser seriados (montados paralelamente), feitos através de seções em eixos distintos, ou os planos podem ser definidos conforme geometria.

A produção de peças utilizando esta técnica pode ser realizada através de ferramentas digitais de corte, como as fresadoras de dois eixos, máquinas de corte laser e máquinas de corte a água. De certa maneira, a técnica também é usada por softwares de impressoras 3D. As seções, nesse caso, são algumas vezes extremamente delgadas na ordem de micrômetros. As tecnologias que utilizam filamentos plásticos possuem seções mais evidentes e visíveis (imagem 33). A tecnologia de impressão 3D não é exatamente nova, mas a popularização da tecnologia é relativamente recente e advém das primeiras máquinas domésticas de impressão 3D, que passaram a ser comercializadas em 2008. Elas depositam finas camadas de material em *layers*, semelhante a impressoras jato de tinta. A sucessão dessas camadas forma o sólido final.

2.2.2 Tesselação

Tesselação é uma técnica de recobrimento de uma superfície, por unidades de polígonos congruentes ou não, sem que existam espaços entre eles e de modo que a superfície total seja igual ao espaço particionado. Ou seja, uma coleção de peças que formam um plano ou uma superfície. É uma espécie de quebra-cabeça ou malha distribuída através da forma. Mosaicos são uma forma de tesselação (IWAMOTO, 2013). A imagem 34 ilustra um pavilhão elaborado utilizando técnica de tesselação.

Existem técnicas computacionais que permitem tesselar formas. Existem duas maneiras de modelar digitalmente: a partir de curvas NURBS e através de malhas. Os softwares que utilizam malhas usam polígonos para subdividir superfícies. Em geral são de base triangular ou quadrangular. Porém dependendo do algoritmo podem variar formas e densidades a fim de se adequarem a forma desejada, sendo possível usar outros padrões, como o voronoi ou o hexágono. Dependendo da resolução, a forma final pode ter aspecto preciso e alisado, ou facetado e rudimentar. A produção de peças pode utilizar ferramentas de corte e sua montagem pode ser desde manual através da identificação das peças, ou realizada através de braços robóticos (IWAMOTO, 2013).

2.2.3 Planificação/dobradura

Como o nome sugere, planificação é a técnica onde um elemento de três dimensões é planificado ou desdobrado em um plano de duas dimensões. Dobradura é o processo inverso. Quando se utiliza um plano e através de dobras transforma em um elemento 3D. Técnicas de dobraduras podem ser utilizadas para conseguir formas mais rígidas e até movimento. Um exemplo de técnica dobradura é o origami japonês.

Há críticas relacionadas ao uso de dobradura em arquitetura, argumenta-se que as soluções podem não contemplar questões relacionadas à complexidade e também, que podem reduzir a abordagem geométrica a questões estruturais e estéticas. Segundo Iwamoto (2013) através da fabricação digital é possível trabalhar

soluções complexas e usar softwares para realizar planificação das soluções encontradas. Em geral, máquinas de corte laser são utilizadas para produzir peças com este tipo de técnica, mas existem casos que utilizam braços robóticos. A imagem 35 ilustra dobras realizadas por braços robóticos, o trabalho é desenvolvido pelo grupo britânico Robofold.

2.2.4 Utilização de contornos

Esta técnica parte de diagramas 2D para criar formas 3D através de desbaste, que é regido pela regulagem da pressão e número de passagens da ponta (fresa) que executa o desbaste. Ou seja, é uma forma de esculpir utilizando técnica de baixo relevo. O processo produz inerentemente bastante resíduo. Isso deve ser considerado, uma vez que, se intenciona utilizar a técnica em decorrência do impacto ambiental. Para executá-la existem basicamente três tipos de máquinas. Fresadoras que executam tarefas usando dois eixos e meio, três eixos e até 5 eixos de corte (IWAMOTO, 2013). A imagem 36 mostra o procedimento de desbaste através de contornos que guiam o processo.

O processo digital para uso desta técnica requer que a forma 3D seja representada em contornos e que se codifique o processo para uma linguagem que a máquina de fabricação digital compreenda. Esta linguagem é chamada de *G-code*. O *G-code* pode ser produzido por softwares específicos que leem o diagrama de contornos e onde se configura o processo e a ordem da usinagem.

2.2.5 Formação

A formação é o processo que utiliza fôrmas para fabricar determinado artefato. Segundo Iwamoto (2013), é uma prática padrão de produzir coisas. Muitos objetos feitos pelo homem utilizam diferentes técnicas de formação para produção de sólidos. Um determinado objeto também pode conter diversos sólidos feitos com fôrmas encaixados entre si. Historicamente a técnica é utilizada para produzir peças modulares, estrutura de concreto pré-moldado e etc.

Em fabricação digital, fôrmas podem ser produzidas através de técnicas de adição de materiais, ou usinagem. Semelhante a outros processos, a fabricação digital possibilita a geração de forma complexas que dificilmente seriam produzidas de fôrma analógicas. O processo é utilizado porque também possibilita produzir peças seriadas e com materiais diversos (PUPO, 2008). A imagem 37 mostra fôrmas produzidas por fresadoras CNC.

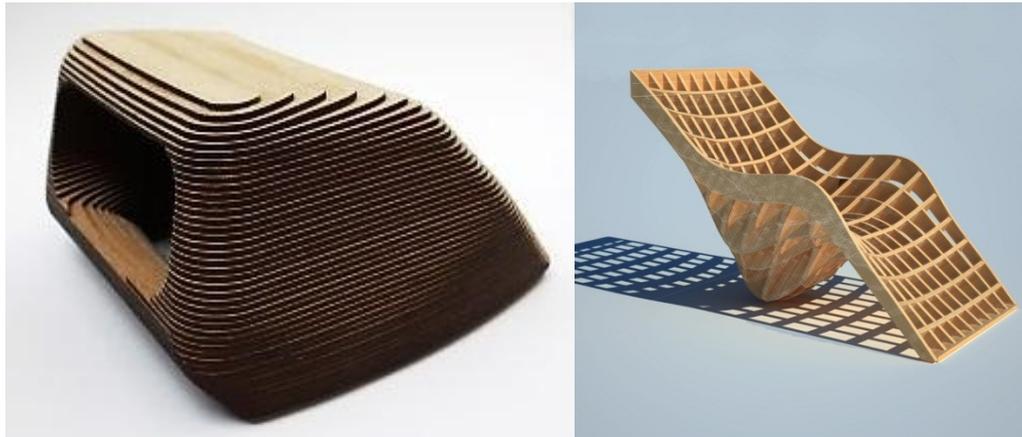


Imagem 31 e 32. Exemplos do uso de seccionamento. Da esquerda para direita: seccionamento realizado com planos seriados e usando dois eixos. Fonte: Han (2014) e Lavayen e Viveros (2013)

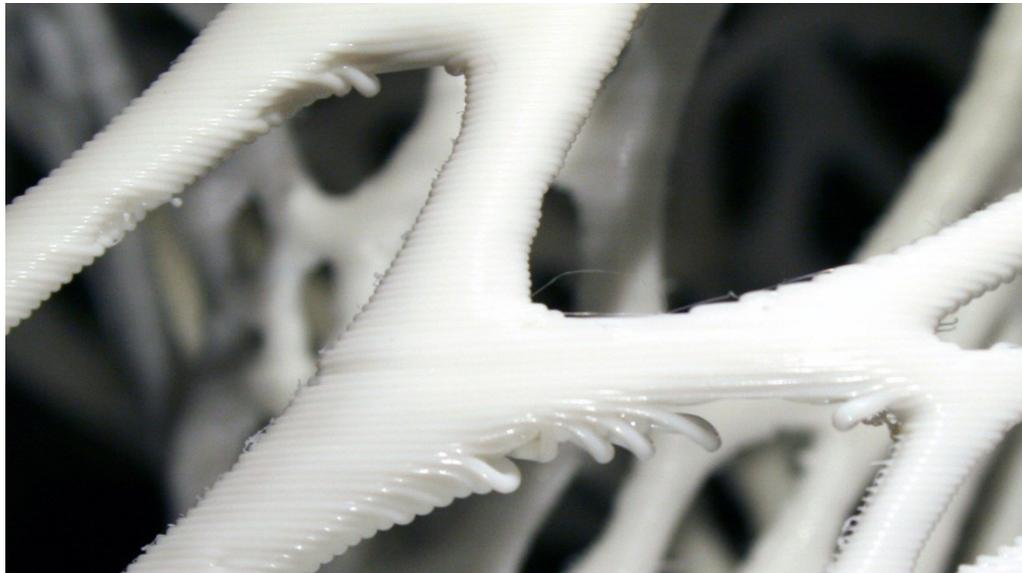


Imagem 33. Aproximação de uma impressão 3D feita em plástico. Fonte: Reprap (2013)



Imagem 34. Exemplo de aplicação da técnica de tesselação em Fabricação digital. Fonte: Iwamoto (2008)



Imagem 35. Exemplo de aplicação da técnica de planificação e dobradura em Fabricação digital. Fonte: Robofold (2012).



Imagem 36. Construção de objeto a partir da definição de contornos que definem o desbaste. Fonte: Such (2015).

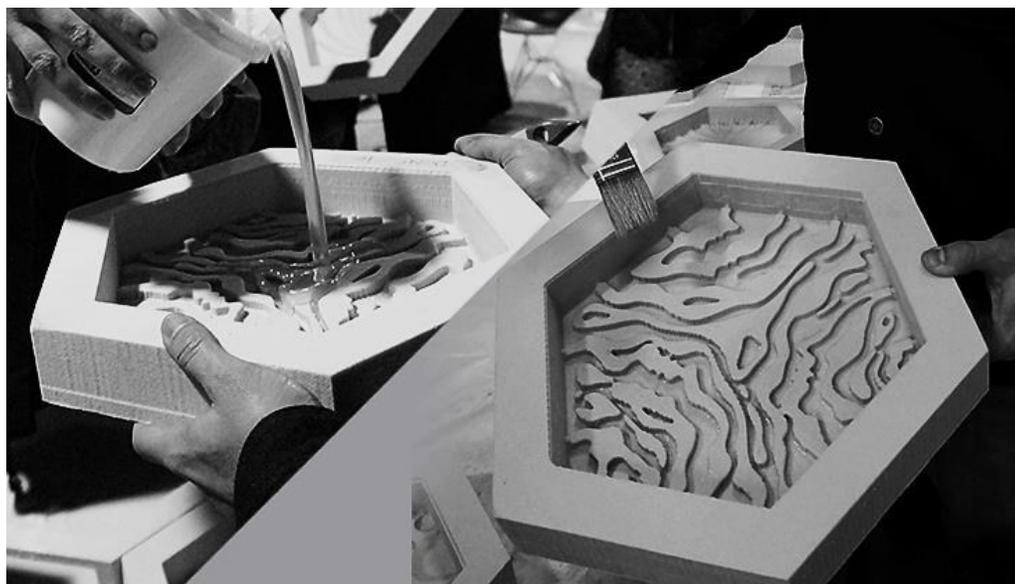


Imagem 37. Uso de fôrmas em Fabricação digital. Fonte: Borbolla (2013)

2.3 Considerações sobre o capítulo

Visto a complexidade de relacionar questões de bioclimatologia e biomimética em resposta a questões contemporâneas de usos urbanos, é natural o entendimento da necessidade de abordagens como as descritas neste capítulo. O capítulo trata de um avanço tecnológico que não descaracteriza necessariamente as discussões de sustentabilidade. Inclusive podem ser utilizadas como meio para superar processos projetuais que visam soluções mais sustentáveis. E possibilitar explorações que buscam soluções integradas entre forma e desempenho. Há pesquisas que intencionam abordar a forma em simbiose com a performance semelhante a soluções encontradas na natureza. Porém essa abordagem é uma corrente em ascensão que ainda tem muito campo para desenvolvimento.

Processos algorítmicos/paramétricos e a fabricação digital são meios que podem ser utilizados para explorações biomiméticas. **Processos algorítmicos** (sejam por via de código de texto, ou gráfico) podem contribuir para melhorar processos projetuais, pois reduzem limitações das ferramentas tradicionais, liberando o projetista para planejar o processo paramétrico a ser incorporado em seu projeto. Ou seja, o *designer* “constrói” uma ferramenta para executar ações específicas de acordo com as intenções projetuais. **Processos paramétricos** por sua vez, colaboram com a automação de determinado processo do projeto. Contribui para reduzir tempo e executar variações de soluções. Além de contribuir para integrar e computar abordagens multidisciplinares concomitantemente. Colabora com a compreensão do projetista, e pode ser usado para computar padrões que podem ser utilizados para estabelecer soluções. A **fabricação digital** pode ser um meio para materializar de maneira rápida e acessível objetos complexos frutos de explorações biomiméticas e paramétricas. É importante avaliar o processo escolhido de materialização, pois existem processos que produzem resíduos, como os subtrativos.

3 Pesquisas no estado da arte

Os estudos do tipo Estado da Arte permitem, num recorte temporal definido, sistematizar um determinado campo de conhecimento, reconhecer os principais resultados de investigações, identificar temáticas e abordagens dominantes e emergentes, bem como lacunas e campos inexplorados abertos à pesquisa futura. O objetivo da presente etapa nesta dissertação é apresentar prioritariamente pesquisas dos últimos 5 anos (entre 2010 e 2015), em três aspectos referentes ao desempenho térmico: o primeiro, mitigação do efeito de ilha de calor; o segundo, sobre o processo de termo regulação de árvores. E terceiro, estudos sobre materiais biodegradáveis com propriedades de resfriamento. Os artigos foram sistematizados e selecionados conforme relevância para o a pesquisa proposta nesta dissertação, além do recorte temporal. Além disso, foram analisados aspectos como fonte de divulgação e o número de citações.

3.1 Estudos sobre mitigação do efeito de ilha de calor

Como visto no item 1.1.1 deste trabalho, o efeito de ilha de calor é o fenômeno de mudança climática mais característica da urbanização. O fenômeno é caracterizado pelo aumento de temperatura em determinadas áreas dentro de uma mesma cidade. Materiais desempenham um papel muito importante na determinação do balanço térmico no ambiente urbano. Esta etapa traz caracterizações contemporâneas sobre o fenômeno, pesquisas recentes sobre estratégias de mitigação e críticas sobre modelos que vem sendo adotado em pesquisas na área.

Trabalhos como os de Mirzaei e Haghghat (2010) identificam na literatura a importância dos projetistas passarem a considerar não apenas o impacto do projeto na qualidade do espaço interno, mas também o seu impacto no espaço urbano. Nesse sentido, apresenta métodos de simulação que colaboram para predição do impacto da construção ainda na fase de projeto. Ao mesmo tempo, frisa as limitações desses métodos relacionados com custos altos e limitações de caracterização da complexidade do espaço urbano, e condições de contorno em tempo real.

Muitas pesquisas que visam o estudo de mitigação do efeito de ilha de calor abordam propriedades térmicas e óticas de materiais usados na arquitetura. Como por exemplo, propriedades de absorvância (o contrário de refletância) e emissividade. Em geral, apresentam materiais claros e com superfícies lisas como tendo resultados positivos. Os resultados indicam que a temperatura superficial de materiais claros podem chegar a ser ligeiramente superiores às temperaturas externas. Uma evolução dessa abordagem utiliza nanotecnologia para melhorar as propriedades de emissividade de matérias claros e até de materiais coloridos, chegando a resultados superiores aos encontrados em superfícies claras (SANTAMOURIS *et al.*, 2011). É apenas nos últimos anos que surgem pesquisas sobre superfícies tecnológicas que manipulam propriedades óticas e térmicas dos materiais, associando os parâmetros a seu impacto no clima urbano (SANTAMOURIS, 2013).

Apesar do esforço tecnológico em se chegar a materiais “frios” e refletivos, ainda é consenso, que a presença de vegetação é uma das principais estratégias para mitigação do efeito de ilha de calor. Trabalhos que visam a explicação do fenômeno e compreensão da escala necessárias para o resultado positivo dessas soluções são encontrados em profusão, tais como o de Onishi *et al.* (2010).

Santamouris (2013) identifica dois grupos de pesquisas importantes sobre mitigação do efeito de ilha de calor: primeiro, as sobre superfícies com alta refletividade e segundo, as sobre superfícies permeáveis que utilizam a capacidade de resfriamento através da evaporação da água. O autor indica que as tendências de pesquisas estão voltadas para o desenvolvimento de pavimentos claros altamente reflexivos, com pigmentos refletivos de infravermelho para aumentar o albedo, também para o desenvolvimento de tintas que mudam de cor conforme desempenho térmico pretendido pelo material. A estratégia de permeabilidade e retenção de água para gerar resfriamento, são mais apropriadas para climas naturalmente úmidos. Já que é necessário de alta disponibilidade de água. O autor critica que ainda falta pesquisas científicas que verifique o comportamento térmico de materiais permeáveis. E indica ser altamente aceitável pesquisas sobre pavimentos frios (alta refletividade e emissividade) (SANTAMOURIS, 2013).

Contradizendo o trabalho de Santamouris (2013), Yang *et al.* (2015) aborda que o uso de materiais reflexivos em abundância pode gerar impactos ambientais em larga escala, tais como, mudança dos índices de precipitação numa cidade. Em pequena escala pode não necessariamente funcionar, já que, simplesmente uma superfície reflexiva pode transferir radiação para uma outra superfície absorvente. Segundo o autor, ainda são necessários estudos que caracterizem melhor os impactos positivos e negativos do uso de superfícies reflexivas, porque os impactos variam, conforme clima e conformação urbana onde estão sendo aplicados. Os autores também indicam que dificilmente os métodos utilizados são suficientes para prevê a total complexidade das variáveis envolvidas no fenômeno.

Crítica semelhante sobre limitações de método, é encontrada no trabalho de Stewart (2011), que apresenta uma revisão bibliográfica na qual identifica “falta rigor científico” em muitas pesquisas sobre efeito de ilha de calor. A literatura se concentra em padrões para escolha de materiais e caracterização de condição de contorno e algoritmos para simulações computacionais. Um dos principais fatores que levam a erros e incertezas são pesquisas que não conseguem controlar a complexidade das medições em espaços urbanos reais (sejam simulações ou medições *in loco*). Segundo o autor, muitas vezes é preferível medições controladas com poucas variáveis do que medições com muitas variáveis, as quais fogem do controle do pesquisador e é de difícil caracterização.

A lista de estratégias ainda relevantes para mitigação do efeito de ilha de calor, são: o uso de **pavimentos reflexivos, telhados verdes, *phase-change materials***⁸ e uso de **superfícies permeáveis** (YANG *et al.*, 2015). Gago *et al.* (2013) apresentam um conjunto de cuidados que vão desde o planejamento urbano até o planejamento de edifícios. Segundo os autores, existem três elementos a serem considerados no planejamento urbano, que têm um grande impacto sobre a variação de temperatura na cidade em escala local: edifícios, espaços verdes, e pavimentos.

A distribuição de edifícios e de estruturas urbanas de uma cidade afetam a formação da ilha de calor, uma vez que esta distribuição geralmente determina a absorção da radiação solar e a formação de fluxos de ar. Por exemplo, a combinação de edifícios altos e ruas estreitas que aprisionam o ar quente e reduzem o fluxo de ar geram ventos de velocidade baixa, que não dispersam bem as partículas em suspensão e gases poluentes. Segundo os autores, a geometria urbana pode influenciar em até 30% do consumo de edifícios comerciais. A aplicação de medidas destinadas a combater ou atenuar o efeito de ilha de calor depende de uma ampla gama

⁸ Não traduzido para o português. O termo se refere a materiais capazes de armazenar e libertar grandes quantidades de energia. O calor é absorvido ou liberado quando o material muda de estado físico. Podem ser orgânicos, inorgânicos, compostos e/ou serem materiais higroscópicos (materiais que acumulam água, o efeito é possível através da mudança do estado físico da água).

de fatores, alguns dos quais podem ser incorporados em estratégias de planejamento, enquanto outros estão fora do âmbito da utilização e da geometria dos espaços.

Parques e espaços verdes ajudam a mitigar o efeito de ilha de calor e reduzir o consumo de energia de edifícios além de estabilizar as temperaturas causadas por materiais de construção. Finalizando, segundo Gago *et al.* (2013) Cobertura vegetal melhora o desempenho energético dos edifícios, bem como as condições ambientais da área circundante. Se o coeficiente de albedo é aumentado, é possível realizar economias de energia diretas de 20 a 70%.

A pesquisa apresentada por Zinzi e Agnoli (2012) sobre telhados verdes, indica algumas variáveis relevantes para o desempenho de elementos arquitetônicos que incorporam plantas visando eficiência energética e mitigação do efeito de Ilha de Calor. As variáveis apresentadas entram em consonância com o trabalho apresentado por Santamouris (2014), que organiza essas variáveis. O autor apresenta quatro classificações de variáveis que influenciam no desempenho de superfícies arquitetônicas vegetadas quanto a redução do efeito de ilha de calor:

Variáveis climatológicas: Em particular a radiação solar, temperatura ambiente, umidade ambiente, velocidade do vento e precipitação. A intensidade da radiação solar determina em grande parte da temperatura de armazenagem de calor das superfícies, bem como a quantidade de calor transmitido para a construção e a evaporação. As características espectrais da radiação solar incidente, também são importantes. A cor, a umidade e a estrutura das camadas variam a transmitância, refletância e a absorvância dos materiais. A temperatura ambiente é uma variável chave e determina a quantidade de calor sensível liberado pelos materiais. A velocidade do vento e turbulência atmosférica define o coeficiente de transferência de calor entre a superfície e a atmosfera e determina o fluxo de calor sensível. Velocidades de vento mais altas aumentam o fluxo de calor sensível e evapotranspiração de superfícies vegetadas.

Variáveis ópticas, em particular, o albedo de radiação solar e da emissividade das superfícies. Altos albedos diminuem a absorvância e a acumulação de calor e diminui a sua temperatura de superfície. A emissividade dos superfícies define a sua capacidade de dissipar o calor através da emissão de radiação infravermelha. Valores de emissividade mais elevados correspondem a temperaturas de superfície mais baixos e maior potencial de mitigação. O valor típico de emissividade para um telhado verde varia 0,9-0,95, dependendo do tipo de plantas (Gates, 1980 apud Santamouris, 2014). As plantas absorvem energia radiante para melhorar a fotossíntese biológica impedindo a absorção da radiação pelo solo e a estrutura dos edifícios. Quanto maior o teor de água da folha mais elevada é a absorção da radiação visível. Pesquisas apresentadas por Santamouris (2014) indicam que superfícies com vegetação espessas verde escuras apresentam temperaturas mais baixas do que superfícies cobertos com vegetação esparsa. E indicam que a densidade da vegetação é um fator relevante para o arrefecimento. Segundo Santamouris o fator albedo influencia o desempenho de superfícies vegetadas na arquitetura. Albedos altos colaboram (superior a 0,7) com melhores resultados, enquanto albedos medianos, apresentam resultados positivos, porém, menos significativos.

Variáveis térmicas. A capacidade térmica e a transmitância térmica são parâmetros térmicos principais que definem o desempenho de materiais opacos das construções. Esses fatores em conjunto com a vegetação favorecem, ou não o desempenho da envoltória vegetada.

Variáveis hidrológicas. As perdas de calor latente com a evaporação está associado ao vapor de água a partir das plantas e do solo em um telhado verde e é igual à energia térmica obtida pela transição de fase das moléculas de água (a partir do líquido para a fase de vapor). No solo, o calor latente é transferido por difusão de vapor em

poros. A transferência de calor depende principalmente do teor de água e da temperatura. A evapotranspiração na superfície de plantas envolve três processos específicos, (a) a evaporação de água no interior das folhas, em seguida, (b), a difusão de vapor para a superfície das folhas e (c) o transporte do vapor a partir da superfície das folhas para o ar. O fluxo de energia relacionados com a evaporação de água a partir das folhas depende principalmente da pressão de vapor na superfície da folha, a pressão de vapor correspondente na copa e a resistência interna para a transferência de vapor na copa.

Yeang (2006) listou estratégias de projeto para mitigar o efeito de ilha de calor que ainda vão de acordo com essas abordagens atuais, destacam-se:

- Projetar visando criar superfícies vegetadas. Podendo associá-las as superfícies edificadas.
- Reduzir a absorção de calor pelas superfícies criadas pelo homem e aumentar sua permeabilidade.
- Revisar configurações urbanas que colaborem com a redução da absorção do calor e não prejudiquem fluxo de ar.
- Certificar que a forma e a configuração do edifício não piora o efeito de ilha de calor.
- Selecionar cores e superfícies que refletem a luz.
- Adicionar árvores e áreas ajardinadas ao espaço urbano.
- Projetar edifícios considerando a topografia da localidade.
- Projetar edifícios vazados que não impacte negativamente no fluxo de ar.
- Projetar ruas com orientações que evitem a absorção do calor do sol.
- Usar evapotranspiração e processos de resfriamento evaporativo.
- Projetar espaços urbanos que visem reduzir o tráfego de veículos.
- Planejar superfícies sombreadas.

3.2 Modelos naturais e considerações sobre materiais

Esta etapa aborda considerações sobre materiais quanto ao seu efeito de mitigação do calor. Está dividida em três partes. Primeira, como as plantas promovem redução de calor. Segundo, o uso de fibras para redução de temperatura superficial. Terceiro, o uso de hidrogéis para reduzir temperatura superficial. A seleção de abordagens foi realizada em concordância com os princípios biomiméticos. Ela busca a compreensão de modelos naturais a mitigação do efeito de ilha de calor e aborda algumas considerações sobre materiais em concordância com a exploração.

3.2.1 Plantas e como promovem redução de temperatura

Segundo El Ahmar e Fioravanti (2014), as plantas evoluíram com função de termorregulador natural. Seu trabalho investiga características biológicas a esta função visando à aplicação no design de edifícios. As árvores e plantas são estruturas flexíveis que são sensíveis às condições climáticas e como uma resposta, eles desenvolveram uma série de características e recursos que ajudam na superação de determinadas situações. No caso de ambientes quentes, estas características ajuda na regulação térmica, através da minimização do ganho de calor, ou maximização a perda de calor. Segundo El Ahmar e Fioravanti (2014), as folhas possuem contribuição importante. Algumas características podem ser destacadas:

1. **forma:** folhas menores e mais estreitas evoluíram em climas quentes, elas produzem menos atrito com o ar e portanto, menos resistência e mais perda de calor por convecção dissipação. Folhas serrilhadas também contribuem para diminuir a resistência do ar e melhorar convecção. Outra observação sobre a forma das folhas é que algumas desenvolveram uma forma dobrada que permite um auto-sombreamento e, conseqüentemente, reduz o ganho de calor.
2. **cor:** determinadas folhas possuem a presença de uma camada de cera para reflexão, essa cera torna a superfície mais brilhante e têm cerca de 20% menos absorção solar se comparado a outras que não possuem essas características. Segundo os autores, essa especialidade tem sido observada em plantas de climas áridos.
3. **evapotranspiração:** a distribuição dos estômatos é outro aspecto muito importante, folhas de sol em geral possuem mais estômatos por unidade de área do que as de sombra. Isso significa melhor a perda de calor através da transpiração. Segundo o autor, as folhas de sol podem transpirar até 12 vezes mais do que folhas de sombra. Essa característica é válida para climas úmidos, onde as plantas não tem tanto problema em perder líquido.
4. **orientação:** plantas também sofrem efeitos da mudança da orientação solar. As folhas se posicionam em relação ao sol de forma a melhorar sua interação com o clima, provocar sombreamento e melhorar
5. **Sistema circulatório.** Esse sistema tem função de transportar um ponto a outro seiva com o mínimo de investimento em energia e massa e também servem para sustentar o comportamento mecânico e estrutural das folhas. Quanto ao gerenciamento do calor, existe a hipótese que quando esses sistemas são fechados, a água é levada utilizando percursos mais curtos possíveis, aumentando a eficiência do sistema. Outra razão é o aumento da segurança, se comparado com sistemas abertos, assim se um caminho é danificado, água e substâncias podem utilizar rotas alternativas.

Existem trabalhos que indicam outras abordagens, Zhu *et al.* (2008) indicam, por exemplo, percentuais máximos encontrados de conversão da radiação solar em biomassa pela fotossíntese, chegando em 6% em seus resultados. Nem todo o espectro de luz solar pode ser convertida pela fotossíntese, segundo a pesquisa, cerca de 48% do

espectro de luz é passível de ser convertido. Considerando esses dados, pode-se dizer que árvores favorecem o balanço energético, quando utiliza parte da radiação como fonte de alimento, sendo portanto, mais uma característica que pode beneficiar o clima urbano.

Árvores da região nordeste do Brasil, também podem indicar algumas características. O Oitizeiro, por exemplo, muito utilizado em áreas urbanas, é conhecido pela sua propriedade de resfriar o espaço (TEJAS *et al.*, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2013). A razão está relacionada à forma de sua copa e seu metabolismo. A copa frondosa que chega a ter dez metros de diâmetro, por exemplo, promove sombra e permite a ventilação. Foram observadas algumas considerações morfológicas da folha que valem ser abordadas: ao analisar a folha do Oitizeiro, (MONTEIRO *et al.*, 2012) encontra tricomas (tecido que reveste a superfície da folha) simples e com filamentos de alta densidade, intensamente enrolados, dando um aspecto de lã (uma espécie de fibra).

Esse tipo de característica, com base nas conclusões obtidas por El Ahmar e Fioravanti (2014), podem colaborar na regulação de temperatura superficial da folha, pois através de sua morfologia, podem absorver umidade, servem para sombrear, e sua cor mais clara ajuda a refletir a luz. A imagem 38 mostra a foto de um pedaço da folha do oitizeiro. A fibra branca da superfície é o tricoma. Percebe-se que em decorrência da cor possui uma refletância maior que a folha (cor mais clara). A imagem 39 mostra a morfologia microscópica deste tecido.

Com base nos estudos, além das características geométricas das árvores e plantas que favorecem a redução da influencia da radiação, existe outra fundamental que pode ser destacada: o uso da água como termorregulador. Com base nessa característica, duas abordagens para materiais que podem servir na emulação em artefatos foram selecionadas, são elas: fibras vegetais e hidrogéis. A primeira, por possuir características higroscópicas⁹ e a segunda por sua capacidade hidrofílica¹⁰. A seguir serão abordadas pesquisas que consideram essas característica como potencial uso em edifícios.

⁹ Capacidade de absorver água.

¹⁰ Capacidade de atrair a água.



Imagem 38. Pedaco de uma folha de oitizeiro mostrando seu tricoma. Fonte: Kitayama *et al.* (2010)

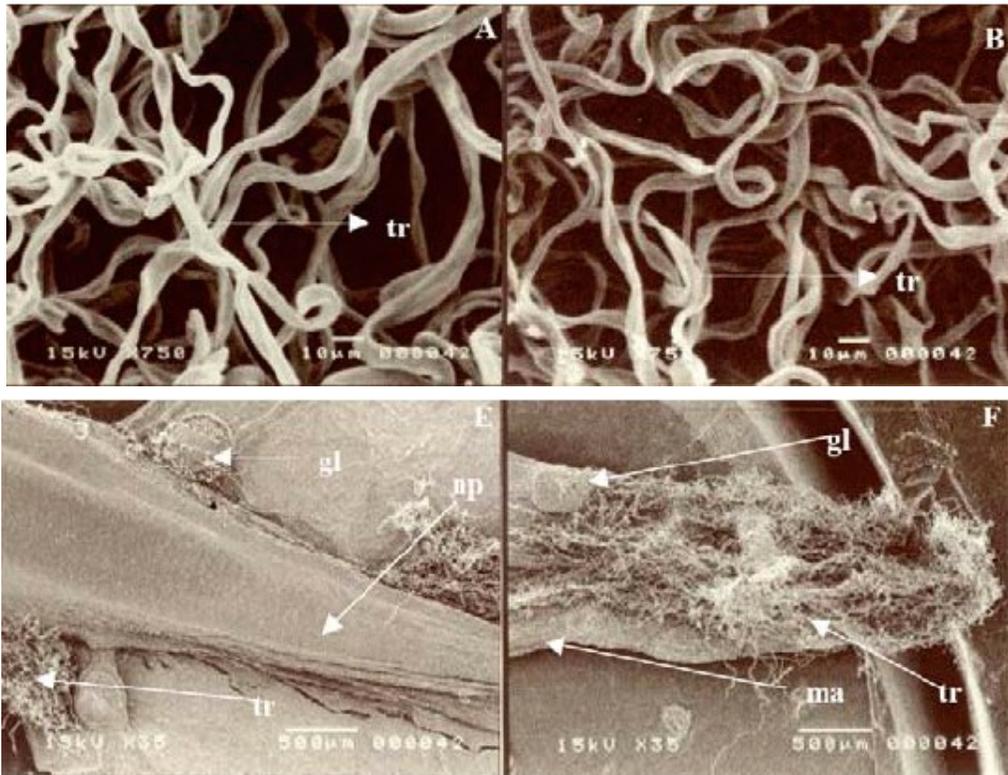


Imagem 39. Imagens microscópicas do tricoma da folha do oitizeiro indicado pela legenda “tr”. Fonte: Monteiro *et al.* (2012).

3.2.2 Fibras naturais para redução de temperatura superficial

Fibras vegetais já eram utilizadas na arquitetura vernácula tropical, a exemplo da arquitetura balinesa. Segundo Ho (2013), a combinação do uso de fibras naturais e a geometria da construção eram responsáveis por resultados positivos quanto a regulação da umidade e melhoria do microclima. Além disso, esses materiais podem ser facilmente encontrados. O efeito benéfico no microclima, se deve em parte, a propriedade natural higroscópica encontrada nesse tipo de material. O trabalho de Ho (2013), utiliza conceitos de biomimética, para elaborar tecidos com base no estudo de fibras. Sua intenção é entender e intensificar o efeito higroscópico em um tecido.

Segundo Straube (2006), a molécula da água tem característica de polaridade. Os dois átomos de hidrogênio são positivos, e o átomo de oxigênio, negativo. As moléculas atraem-se em decorrência desta polaridade formando grupos. Quando se aquece a água esses grupos se quebram em outros menores. Alguns materiais tem capacidade de atrair água através da polaridade, ou são permeáveis aos grupos de moléculas. Segundo Ho (2013) a capacidade de determinados materiais de repelirem (hidrofóbicos) ou de atraírem (hidrofílicos) a água vai depender do ângulo de contato da partícula hídrica com a superfície do material. Já a porosidade faz com que sejam capazes de absorver e reter em seu interior as moléculas de água. Segundo Straube (2006):

A água em estado líquido é realmente sugada por tubos muito pequenos chamados capilares presentes em materiais porosos: quanto menor o tubo maior é a sucção capilar. A sucção (ou absorção) por capilares interligados explica como a água é sugada dentro de um salsão, num tijolo, e no topo de árvores altas. Alguns materiais, como o silicone, óleos e alguns plásticos repelem água, e esta repulsa faz a água acumular em cima (por exemplo, a chuva no concreto embebido em óleo ou a água em um papel encerado). Straube (2006), traduzido pela autora.

As fibras são porosas e possuem capilares, por isso absorvem a água. Quando sua capacidade chega a um estado de saturação, ou quando o ambiente está seco, o material passa a emitir a água de volta para o meio ambiente. Esse fenômeno é essencial no processo de regulação climática e resfriamento dos ambientes. As fibras celulósicas interagem com a água, não só na superfície, mas também no seu volume. A quantidade de água adsorvida depende da umidade relativa do ambiente em que a fibra se encontra em equilíbrio (GAUTHIER *et al.*, 1998). Esta característica reduz a influência do calor através da mudança de fase da água, quando em contato com o movimento do ar, ou quando aquecida. Essa interação favorece condições para geração de microclimas amenos. A estratégia também pode ser utilizada para controle da umidade em um determinado espaço (HO, 2013).

3.2.3 Uso de hidrogéis para redução de temperatura superficial

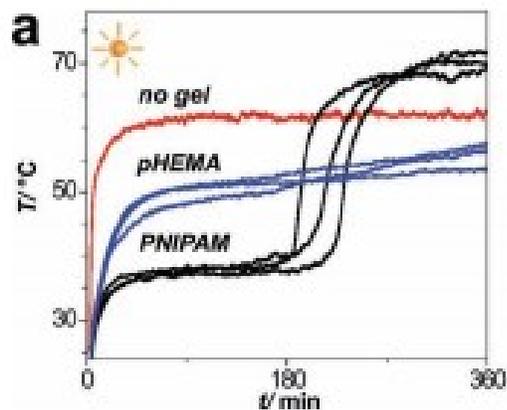
Para complementar a abordagem da fibra como material higroscópico, o item 3.2.3 aborda o uso de hidrogéis, que são hidrofílicos. Os últimos, são polímeros que podem usar matéria-prima natural ou artificial e podem absorver até 500 vezes seu peso em água. Pesquisas recentes indicam resultados promissores quanto ao seu uso como estratégia para reduzir temperatura superficial e melhorar o *design* de edifícios. Duas pesquisas são abordadas neste trabalho: a apresentada por Rotzetter *et al.* (2012) e a aplicação apresentada por Rathee *et al.* (2014).

O primeiro estudo a ser abordado é o apresentado por Rotzetter *et al.* (2012). O autor realiza uma análise comparativa considerando os efeitos na temperatura superficial gerados em um telhado fictício, usando um hidrogel convencional, o PHEMA, e usando um hidrogel com propriedades termo-responsivas, o PNIPAM. O estudo considerou maquetes para análise e fontes de radiação artificial idênticas para cada uma. O resultado

mostrou que ambos o PHEMA e o PNIPAM obtiveram desempenho superiores, a maquete sem hidrogel. Sendo o PNIPAM, o hidrogel que desempenhou melhor (imagem 40).

Além da presença da água, o fator responsável pelo desempenho do PNIPAM tem relação com sua termo responsividade. Ao atingir os 35°C, este hidrogel torna-se hidrofóbico e expela a água de seu interior. O gráfico 1 apresenta os resultados relatados, e mostra a mudança de comportamento do PNIPAM ao atingir a temperatura de 35°C. Além de apresentar o resfriamento de superfícies, o polímero termo-responsivo, promove um processo de reciclagem da água armazenada e segundo os autores, pode ser associada aos períodos de chuva. Os autores indicam que esta abordagem tem potencial em climas quentes e úmidos.

Gráfico 1. Dados de temperaturas levantados no ensaio. Fonte: Rotzetter *et al.* (2012)



Outra pesquisa que explora a aplicação de hidrogéis em envoltórias arquitetônicas é a apresentada pelo IAAC (*Institute for advanced architecture of Catalonia*). A pesquisa visa produzir envoltórias capazes de resfriar o edifício usando apenas recursos passivos. A pesquisa manifesta uma inspiração que advém da biomimética. Sua intensão é de emular a transpiração, estratégia natural de resfriamento em animais. A principal estratégia utilizada é a incorporação de um hidrogel em um painel de cerâmica. O hidrogel é contido pelo sistema através de um tecido (imagem 41). Segundo Rathee *et al.* (2014), os protótipos foram testados através de uma análise térmica comparativa. Um protótipo com hidrogel e outro sem hidrogel, ambos foram expostos a uma fonte de radiação. O protótipo que continha o hidrogel, resultou em 5 graus Celsius diferença de redução de temperatura.

Apesar das conclusões promissoras das pesquisas com hidrogéis aplicadas a arquitetura, existe uma ressalva a ser feita. Ambas pesquisas ainda não apresentam aplicações reais em edifícios ou analisam a interação do hidrogel com meio urbano em um longo período de tempo. Existem poucas pesquisas em curso, porém as conclusões e os resultados preliminares indicam que se trata de um campo de pesquisa promissor.

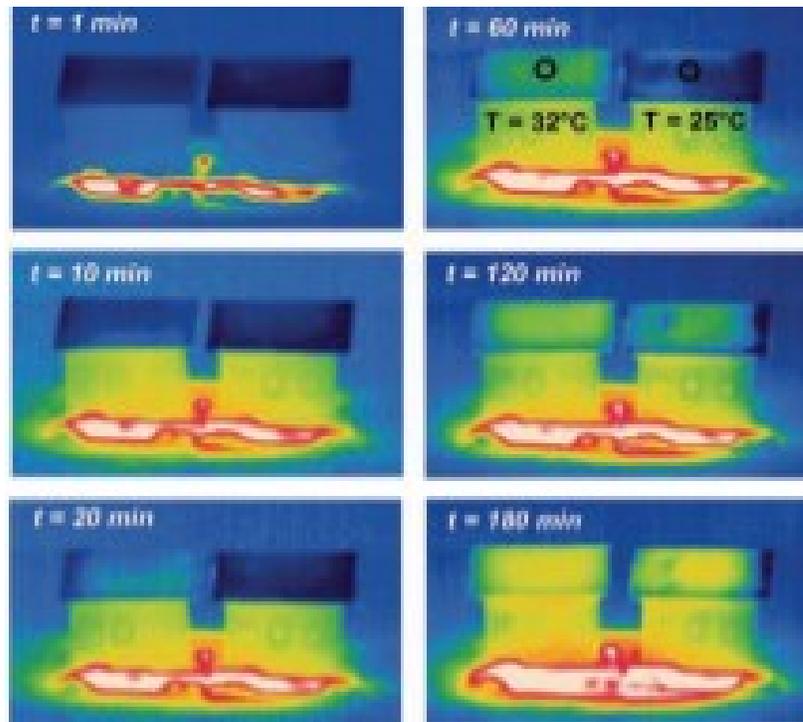


Imagem 40. Imagens de infravermelho mostrando a maquete com telhado usando phema (esquerda) e o telhado usando PNIPAN (direita). Fonte: Rotzetter *et al.* (2012)

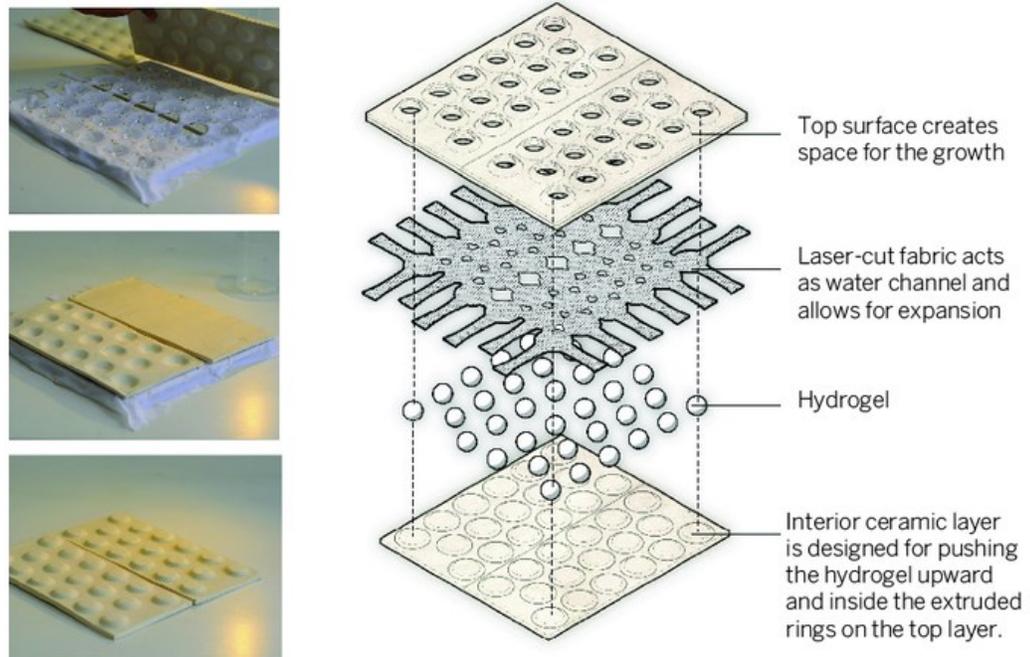


Imagem 41. Protótipo do painel cerâmico com hidrogel. Fonte: Rathee *et al.* (2014)

Métodos

Esta etapa apresenta os tipos de métodos de pesquisa e os procedimentos sistemáticos estabelecidos para executar o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa. Os procedimentos estão divididos em cinco partes: primeiro a contextualização. Segundo, o estabelecimento de princípios e critérios de design. Terceiro, etapas para um modelo paramétrico/algorítmico. Quarto, etapas escolhidas para prototipagem. Quinto, apresenta os procedimentos de avaliação dos protótipos.

4 Procedimentos

O objetivo da pesquisa é investigar potencial da integração entre parametrização da forma, prototipagem rápida e preceitos biomiméticos, em resposta a questões bioclimáticas apresentadas por um artefato gerador de microclima para o clima quente e úmido. Os procedimentos metodológicos desta pesquisa são baseados no método desenvolvido pelo Biomimicry Group 3.8 (2011). Conforme apresentam Groat e Wang (2002) em seu livro sobre métodos de pesquisa em arquitetura, esta pode ser classificada como uma pesquisa na área de simulação e modelagem com aplicação prática. Utiliza métodos qualitativos e quantitativos de pesquisa. O método utilizado é o de estudo de caso. Além da revisão bibliográfica, será utilizado um simulador de modelos matemáticos, um modelador que possibilite integrar esses modelos à forma do objeto estudado, além de um experimento prático que utiliza técnicas de prototipagem.

A pesquisa prevê quatro objetivos específicos. O primeiro objetivo: **aplicação e avaliação da metodologia desenvolvida pelo Biomimicry group 3.8**. Para tanto, todas as etapas desta pesquisa tem inspiração neste método. O segundo objetivo: **identificação de soluções da natureza para mitigação da influência do calor**. Investiga pesquisas sobre mitigação do efeito de ilha de calor e o processo de termo regulação de árvores. O terceiro objetivo: **definição de processo de parametrização**. Trata da definição de algoritmos de modelagem e da modelagem do estudo de caso (a partir das condições de contorno e soluções pré-estabelecidas nos estudos de biomimética). O quarto e último objetivo, **construção de protótipos e análise**; aborda processos de materialização com aporte de ferramentas digitais. Também utiliza técnicas práticas de prototipagem. A etapa de análise utiliza técnica de comparação para avaliar o desempenho térmico do protótipo.

A proposta é concebida a partir da adaptação do método desenvolvido pelo *Biomimicry group* 3.8 (2011). A intenção é abordar processos de design em sustentabilidade que intencionam obter uma solução robusta, e passível de evolução. Não é a intenção dessa pesquisa obter uma resposta definitiva, mas sim, de identificar hipóteses e estratégias possíveis, que amplie a discussão sobre mitigação de calor através de processos passivos. As etapas do trabalho intencionam obedecer a uma série de princípios como: redução do consumo de energia no processo de fabricação, minimização de perdas térmicas, ergonomia adequada e redução do impacto ambiental pela seleção mais adequada de materiais, diminuindo o consumo de matéria prima e energia. O desenvolvimento da proposta está baseado nas seguintes etapas:

1. **Contextualização** (identificação de soluções da natureza) com dois momentos distintos:

a) revisão bibliográfica e levantamento do estado da arte em pesquisas sobre mitigação do efeito de ilha de calor e em relação a capacidade de resfriamento das plantas.

b) estabelecimento de princípios e critérios conforme método desenvolvido pelo *Biomimicry group* 3.8 (2011).

2. **Experimentação** (emulação de soluções da natureza para mitigação da influência do calor): expressa as diretrizes de projeto desenvolvidas na etapa de contextualização sob a forma de modelagem e visualização computacional combinando estratégias selecionadas na etapa anterior. A etapa permitirá a definição de estratégias e aprimoramento das soluções com base em princípios biomiméticos. Foi dividido em dois momentos:

a) análise das condições de contorno (Estudo do clima e estabelecimento de estratégias bioclimáticas). Aborda uma análise local do clima de Recife-PE, contexto do estudo de caso. Para tanto, aborda pesquisas que identificam ilhas de calor na cidade e utiliza leitura dos dados climáticos e aplicação de zonas de conforto para estabelecer estratégias bioclimáticas.

b) definição de critérios referência. Utiliza técnica de *brainstorm* para selecionar estratégias biomiméticas e identificar abordagens de emulação para o estudo de caso.

3. **Configuração** (definição de processo de parametrização): explora abordagens e definição de um modelo paramétrico que colabore com a associação entre modelo, simulação de desempenho e solução. Foi dividido em dois momentos:

a) definição do modelo paramétrico. Utiliza *scripting* gráfico usando Grasshopper para estabelecer um modelo responsivo ao clima. Incorpora simulação de incidência de radiação e características climáticas de Recife a um ambiente paramétrico. A etapa utilizou os dados climáticos disponibilizados por Roriz (2012). O simulador utilizado foi o DIVA para grasshopper.

O DIVA é um plugin para *Rhinoceros* e *Grasshopper* desenvolvido em Massachusetts, Minnesota e Nova York. A interface usa o Daysim e o Energy Plus para realizar simulações simplificadas de iluminação e termo-energéticas. Segundo Jakubiec e Reinhart (2011), DIVA permite o associações automáticas e visuais das consequências do modelo arquitetônico proposto. É uma ferramenta para primeiras decisões de projeto, porque possibilita no modelo trabalhar parâmetros como: pico de cargas, quantidade de aquecimento, refrigeração e iluminação necessária anualmente em um espaço. Possibilita analisar automaticamente resultados de acordo com decisões formais trabalhadas. As Simulações em DIVA são controladas a partir de uma barra de ferramentas integrada na interface do Grasshopper e do Rhinoceros 3D (JAKUBIEC e REINHART, 2011).

b) modelagem propriamente dita. Utiliza princípios formais biomiméticos para estabelecer o modelo que originará o protótipo do estudo de caso.

4. **Prototipagem**: permite materializar abordagens das etapas anteriores sob um artefato realizado para estudo. É dividida em dois momentos:

a) materialização. Utiliza técnica de prototipagem rápida utilizando método aditivo através de uma impressora 3D.

b) materialização nos materiais propostos pelo estudo biomimético. Intenciona reproduzir e avaliar os modelos nos materiais selecionados. Este último momento utiliza técnica de formação e observação.

5. **Avaliação**: entendida como processo que retroalimenta todos os procedimentos anteriores. Será realizada técnica de comparação, através de medições controladas em laboratório. O ensaio para avaliação térmica foi realizada no LABEME na Universidade Federal da Paraíba (UFPB). O sistema de medição é composto por um micro computador equipado com Datalogger, que é um equipamento destinado a gravar dados durante um tempo programado, podendo eliminar a presença de um operador na sala de monitoramento.

A sala de monitoramento é composta por duas câmaras: a primeira para coleta de dados e a segunda para o teste propriamente dito. Esta segunda câmara é dotada de uma fonte de radiação, compostas por lâmpadas incandescentes e um termômetro de globo, para medição da temperatura radiante. As duas são separadas por uma parede, que possui uma abertura de 1,00 por 1,20m.

Para avaliação foi realizada uma parede de 1,00 por 1,20m de poliestireno expandido (isopor), esta parede terá três aberturas com dimensões de 0,22 x 0,22m. As quais serão encaixadas os corpos de provas. O composto proposto neste trabalho será comparado a dois materiais refletantes. São eles: o gesso e o cimento branco. Eles serão exposto a fonte de radiação artificial que se encontra na câmara de testes (imagens 42 e 43). O comportamento dos materiais será avaliado através de 06 sensores termopares calibrados (02 em cada corpo de prova). Um colocando na face exposta a radiação e outro colocado na face oposta. Os dados de análise serão coletados a cada segundo e guardados no computador. Para melhorar a visualização dos resultados, será utilizada uma câmera de infravermelho, sedida pelo Labcon-UFPB.

4.1 Limitações

O método encontrado para realizar medições possibilita comparar o desempenho das amostras e definir quem desempenhou melhor, porém não foi realiza de forma a estabelecer um detalhamento dos fluxos de calor. Houve também uma limitação relacionada ao acesso de laboratórios de fabricação digital. A pesquisa obteve acesso a uma impressora 3D do Departamento de Arquitetura da UFRN. Porém a construção do modelo-teste tem que considerar limitação para o tamanho das peças a serem prototipadas, pois a impressora permite uma área de impressão máxima de 22 x 22 cm nos eixos xy.

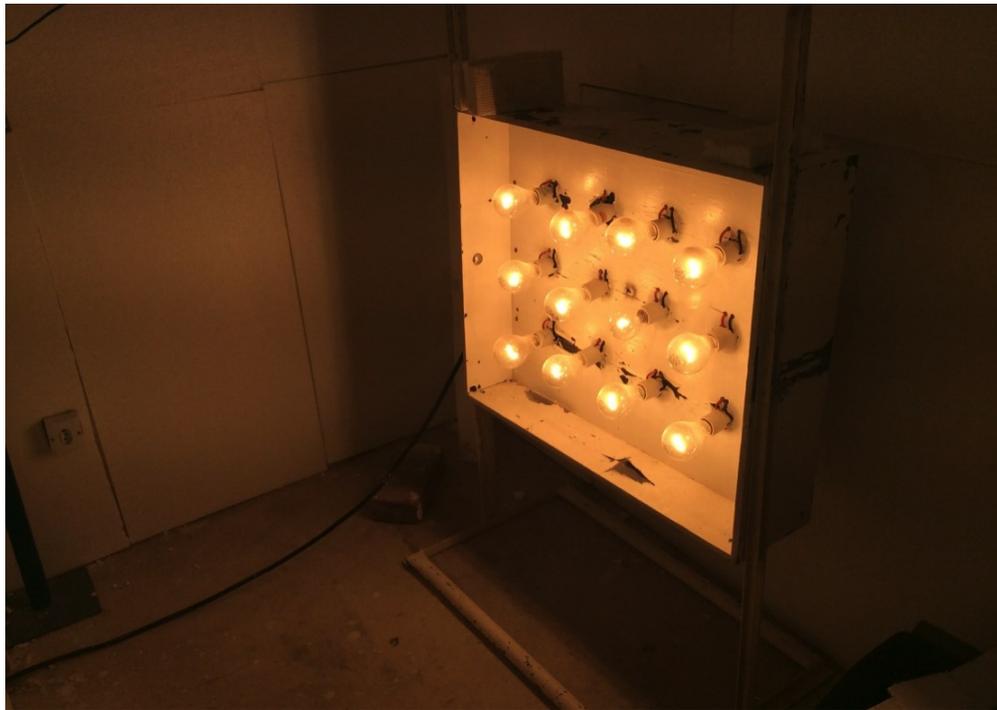


Imagem 42 e 43. Sala de teste térmicos do LABEME e fonte de radiação artificial.

Desenvolvimento

O desenvolvimento refere-se ao processo da pesquisa elaborado diretamente pela autora, com base nos procedimentos metodológicos. A etapa está dividida em três capítulos. O primeiro, desenvolvimento do problema, busca uma compreensão mais local do contexto em que se insere a pesquisa. O segundo, resultados, apresenta etapas práticas que visam produzir indicadores para hipóteses e abrir discussões para pesquisas futuras. O terceiro, considerações finais, discute parte dos resultados, aponta contribuições da pesquisa e algumas limitações encontradas e indicativos para pesquisas futuras.

5 Desenvolvimento do problema

Antes de iniciar o desenvolvimento da pesquisa propriamente dita, e uma vez discutidos os conceitos abordados no referencial teórico; o desenvolvimento da problemática busca uma compreensão mais local do contexto em que se insere a pesquisa. Esta etapa leva em consideração a caracterização do problema no contexto da cidade de Recife-PE. O capítulo de Desenvolvimento do Problema aborda características climáticas de Recife e problemas urbanos enfrentados que possuem relação direta com a interação da massa urbana da cidade e o clima. Especificamente serão abordados temas como: o clima de Recife, a formação das ilhas de calor na cidade e as principais estratégias do projeto bioclimático para a cidade.

5.1 Contexto – (des) conforto em Recife

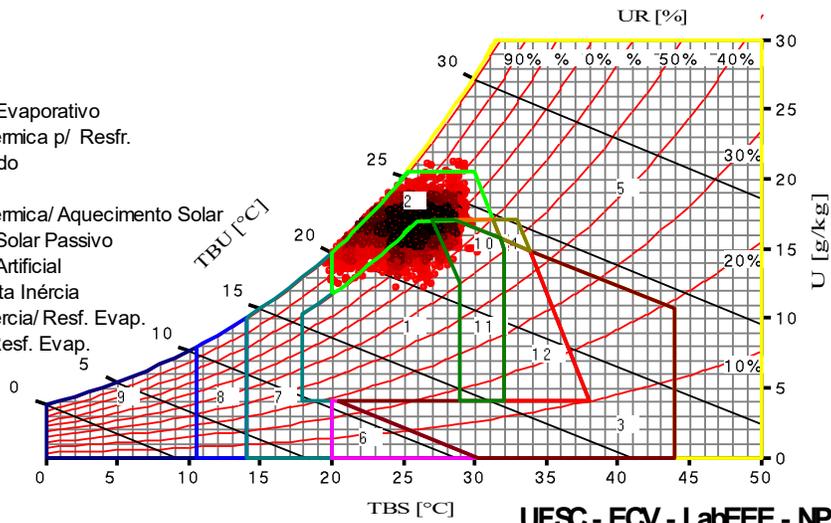
Recife é a capital do estado de Pernambuco e está localizado no litoral brasileiro com latitude: 08° 08' e longitude de 34° 55'. Possui clima tropical quente e úmido, com temperaturas com médias que variam entre 24°C e 28°C no verão e 22°C e 24°C no inverno. A média da umidade relativa está entre 74% e 86%. Recife possui altos índices de radiação, frequentemente ultrapassam 1000kwh. Segundo método criado por Givoni (1992)¹¹, o clima possui 31.9% das horas em conforto térmico e 68.1% de horas em desconforto. Sendo que, 0.0799% das horas são frias e 68% das horas são quentes (imagem 44). Ao utilizar o modelo adaptativo proposto pela ASHARE standard 55 (2010), que considera a aclimação do usuário, o clima de Recife passa a proporcionar 59% das horas em conforto térmico e 41% em desconforto (imagem 45).

As principais estratégias projetuais para o clima de Recife de acordo com a carta psicométrica de Givoni é sombreamento e ventilação, respectivamente. O sombreamento é a principal estratégia bioclimática, devendo ser utilizada durante 99,9% do ano. A segunda estratégia bioclimática para Recife é a ventilação, necessária durante 67,9% do ano. Segundo a norma NBR 15220, Recife está localizada na zona bioclimáticas 8, característica por construções que precisam utilizar elementos arquitetônicos leves e refletores e considerar o uso de ventilação natural permanente no espaços, durante todo o ano. A transmitância térmica da parede deve ser menor ou igual a 3,60 W/m².K. e da cobertura deve ser menor ou igual a 2,30 W/m².K quando não há ático ventilado (NBR, 2005b).

¹¹ Autor utilizado na norma brasileira NBR 15220, ainda em vigência até a data de publicação desta pesquisa.

ZONAS:

1. Conforto
2. Ventilacao
3. Resfriamento Evaporativo
4. Alta Inércia Térmica p/ Resfr.
5. Ar Condicionado
6. Umidificação
7. Alta Inércia Térmica/ Aquecimento Solar
8. Aquecimento Solar Passivo
9. Aquecimento Artificial
10. Ventilação/ Alta Inércia
11. Vent./ Alta Inércia/ Resf. Evap.
12. Alta Inércia/ Resf. Evap.



UFSC - ECV - LabEEE - NPC

Imagem 44. Carta Psicométrica de Recife pelo método de Givoni. Fonte: Labeec (2010)

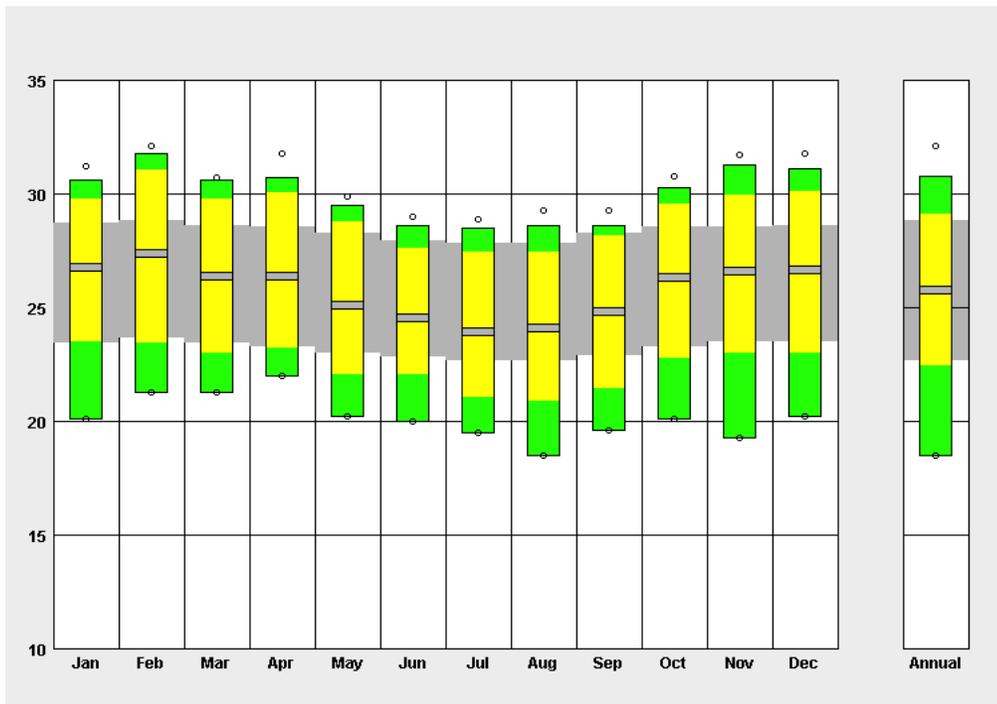


Imagem 45. Modelo mostrando dados climático de Recife e zona de conforto adaptativa proposta pela ASHARE standard 55-2010. Fonte: elaborado a partir de Ashrae (2010)

5.1.1 Ilhas de calor em Recife

Recife possui população estimada em 1.608.488 de habitantes (IBGE, 2014). É a terceira capital mais populosa do nordeste brasileiro. Seu crescimento populacional mais que quadruplicou entre 1940 e os anos 2000. Esse fenômeno resultou na conurbação das cidades vizinhas com Recife e ocasionou diversos problemas de infraestrutura urbana. Recife possui uma das maiores densidades populacionais do país: em torno de 7.300 hab/km² (IBGE, 2014). Atualmente existe muita pressão nas áreas públicas de Recife e nas áreas de patrimônio histórico por meio da especulação imobiliária.

O intenso e desordenado crescimento urbano na cidade do Recife-PE, traz consequências também de ordem ambiental. O uso do solo da Região Metropolitana do Recife possui um elevado percentual de áreas cobertas por asfalto e concreto. A configuração urbana também não contribui, pois a localização dos edifícios mais altos da cidade prejudicam a ventilação urbana e dissipação do calor. O conjunto dos fatores vem provocando gradualmente o aumento do efeito de ilha de calor da cidade.

Dos Santos (2011) utilizou imagens de satélite e identificou um agravamento das ilhas de calor em Recife no período entre 1998 e 2010 (imagem 46). Sendo que as áreas com maior adensamento urbano, com construções verticais e horizontais, destacaram-se como as que possuem temperaturas mais elevadas, como os bairros de Casa Amarela e Santo Amaro. A pesquisa relaciona o agravamento a diminuição da área verde de Recife. As áreas que permaneceram com cobertura vegetal são as que possuem temperaturas mais amenas.

Dos Santos (2011) sugere que o surgimento das ilhas de calor de Recife se devem aos seguintes fatores: concentração de edificações que implica no acréscimo da temperatura; produção de energia antropogênica através da emissão de calor pelas indústrias, tráfegos e habitações; substituição da cobertura vegetal pelos asfaltos; e pela radiação, causada pela emissividade de corpos. A imagem 47 mostra a concentração urbana da cidade de Recife. Uma comparação visual com os dados de Dos Santos (2011) facilmente mostra a relação entre a ilha de calor e a presença das concentrações urbanas no município.

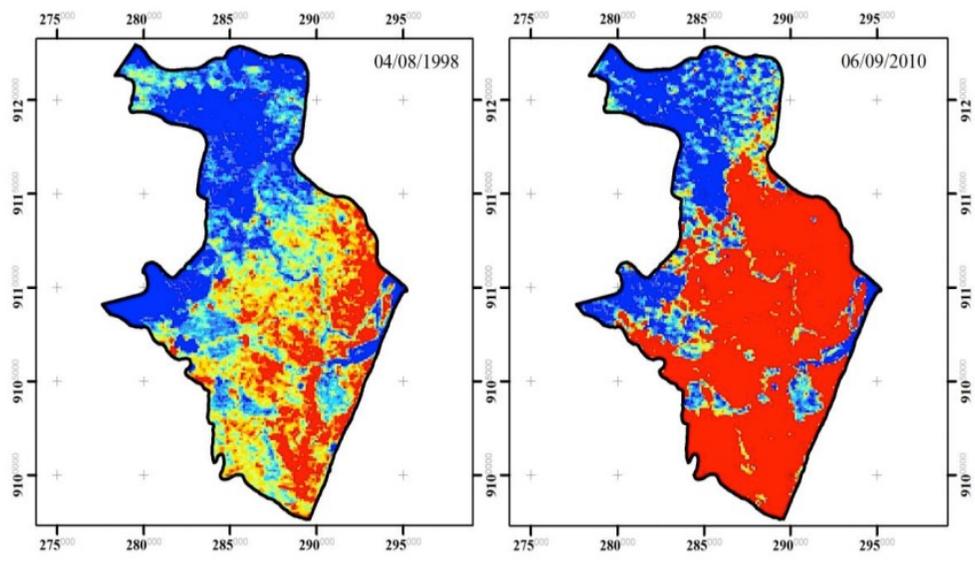


Imagem 46. Ilhas de calor em Recife em 1998 e em 2010. Fonte: Dos Santos (2011).

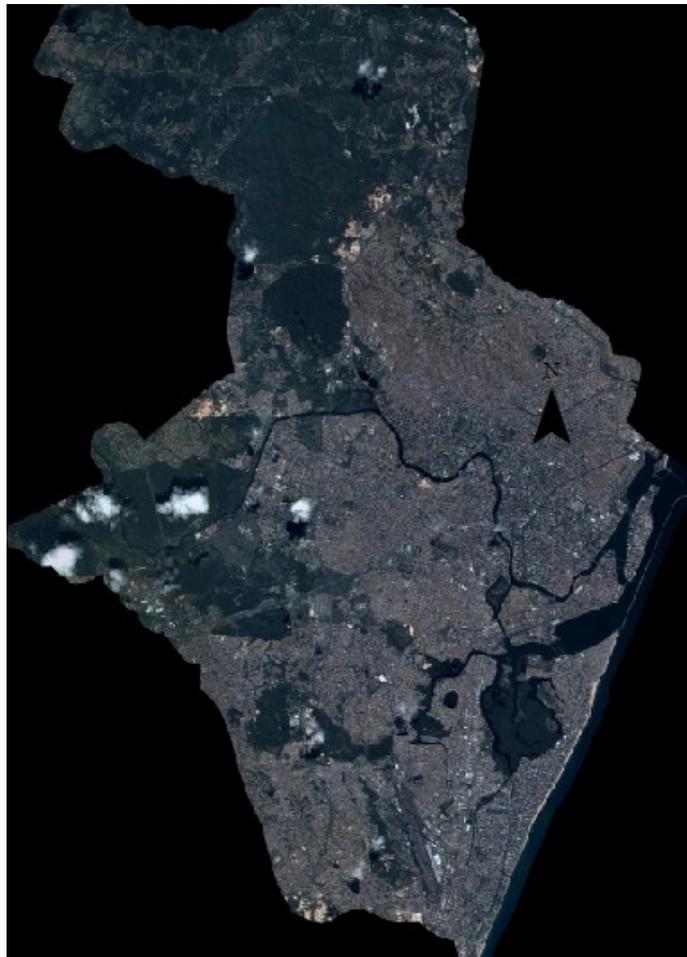


Imagem 47. Aglomerado urbano de Recife. Fonte: imagem retirada de Souza e Corrêa (2012)

5.1.2 Considerações sobre as principais estratégias bioclimáticas de Recife

5.1.2.1 Sombreamento

Em Recife, percentualmente, o sombreamento é importante para todas as orientações, durante todo ano. Porém, são nas horas com maior altitude solar e durante as tardes que o sombreamento é imperativo. As temperaturas mais amenas estão durante as manhãs de inverno. Ainda nesses períodos a estratégia de sombreamento se faz necessária na grande maior parte das vezes (imagens 48,49 e 50).

A máscara com a trajetória solar de Recife é quase simétrica, em decorrência da proximidade da cidade com a linha do equador. Os maiores índices de radiação solar em recife ocorrem nos períodos em que o sol está com ângulo em relação à superfície entre 60° e 0° sendo que, entre 30° e 0° estão presente os picos (alta altitude) (imagem 51). Três considerações básicas podem ser estabelecidas para projetos de elementos de sombra em Recife:

1. As orientações que recebem mais radiação são as que incidem sol nos períodos de alta altitude somados aos de baixa (como as com orientação Leste e oeste), fazendo necessário um elemento de sombra que estabeleça um ângulo vertical de sombreamento (AVS) alto;
2. Orientações que recebem radiação apenas nos períodos de alta altitude (como as orientações norte e sul), faz necessário uso de sombreador que estabeleça um AVS até 30°.
3. Como a posição do sol numa determinada hora varia durante o ano, há situações que se faz necessário um sombreador com ângulo horizontal de sombreamento (AHS) também;

5.1.2.2 Ventilação

As principais funções da ventilação na arquitetura são de higiene, devido à renovação do ar interno, o conforto higrotérmico, devido à remoção do calor gerado na edificação, e a durabilidade dos materiais e componentes, devido o controle de umidade acumulado no interior dos ambientes. Em relação ao conforto térmico em clima quente e úmido, Nicol (2004) afirma que a ventilação pode elevar a tolerância a temperaturas em situações de desconforto em mais de 3°C para a velocidade de 1 m/s. O uso de ventilação natural é a principal estratégia, depois do sombreamento, a ser considerada nos projetos arquitetônicos em Recife. Além disso, considerando a alta umidade em Recife a permeabilidade é importante para o controle da umidade.

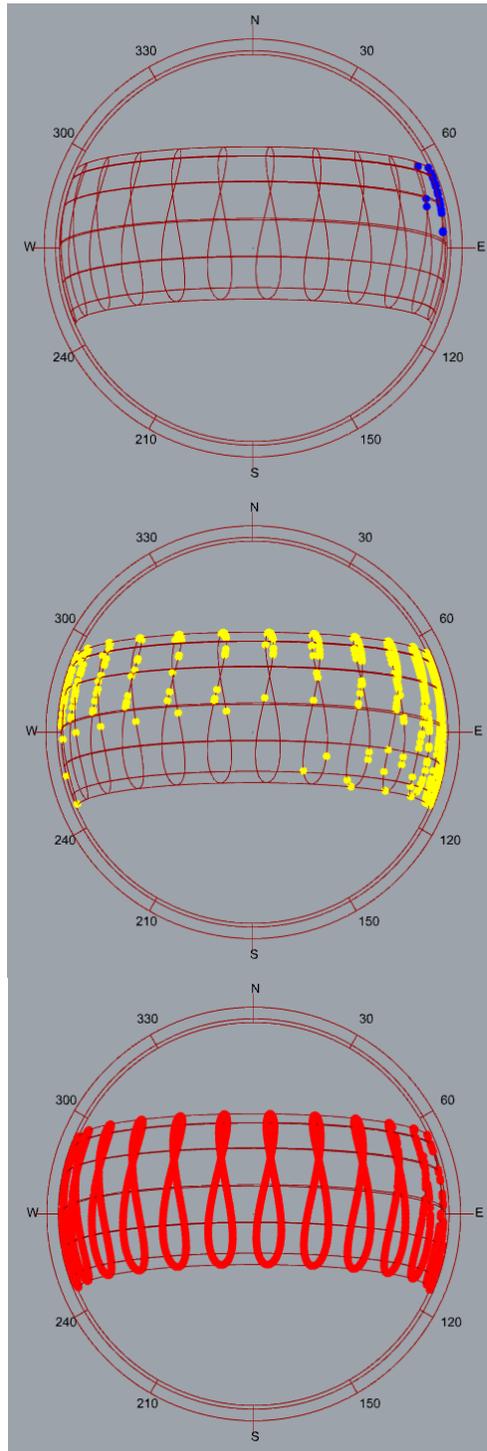


Imagem 48, 49 e 50 percurso do sol durante o ano com dados de temperaturas de bulbo seco para Recife-PE, respectivamente. Os pontos em azul indicam situações com temperatura abaixo de 20°C (0,1%). Os amarelos, temperaturas entre 20°C e 25°C (onde o sombreamento é importante) (18,08%). Os vermelhos indicam temperaturas superiores a 25°C (onde o sombreamento é necessário) (81,82%). Fonte: elaborado pela autora no grasshoper.

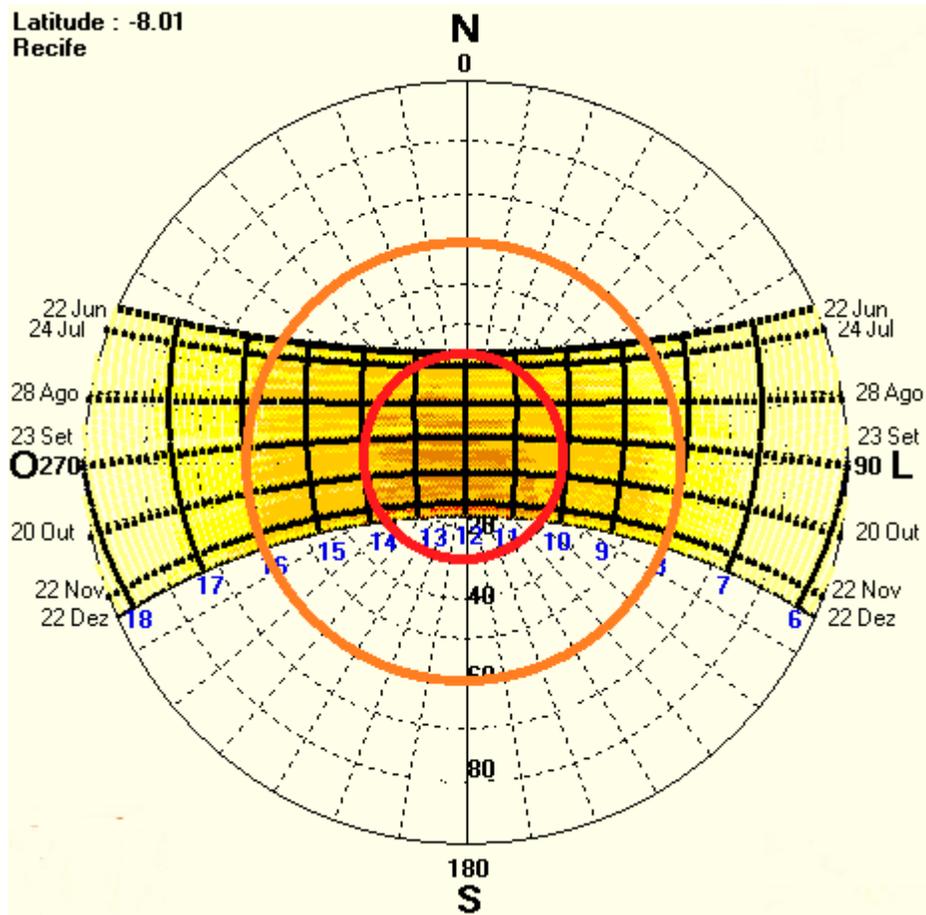


Imagem 51. Máscara solar de Recife com escala de radiação global horizontal. O círculo vermelho mostra a isolinha que represente o ângulo 30° e a laranja o de 60°. Dentro desses círculos estão as maiores incidências de radiação.

5.2 Identificação da função do artefato

Esta etapa visa identificar funções para artefatos arquitetônicos que emulem o efeito das árvores no microclima urbano. As funções foram identificadas com base na leitura feita do contexto de Recife e dos problemas causados pela escolha de materiais nas construções. A tabela 5 apresenta funções recomendadas para artefatos que visem mitigação do calor para o clima de Recife:

Tabela 5. Funções esperadas para o artefato de acordo com o estudo do contexto.

Alta umidade	Regular umidade;
	utilizar umidade para evapotranspiração;
Alta temperatura e radiação	Minimizar impacto da radiação;
	Demanda por sombreamento anual;
	Permitir ventilação natural;
Formação de ilhas de calor	Não contribuir para o efeito de ilha de calor.

5.3 Identificação de modelos naturais ao problema

O conjunto de estratégias foi selecionado a partir da compreensão de como árvores funcionam como resfriadores naturais do espaço urbano. As estratégias identificadas foram:

1. Presença de tricoma em forma de fibra. O tecido que colabora, em determinadas plantas, com o resfriamento da superfície das folhas, já que fibras naturalmente absorvem água da umidade do ar provocando um efeito de resfriamento evaporativo.
2. A fotossíntese, que reduz a influência da radiação, a qual é convertida em energia bioquímica.
3. O processo de evapotranspiração que colabora com a redução da temperatura superficial, já que as folhas armazenam água e sua liberação aumenta o efeito de evaporação.
4. Sombreamento. Provocado pela copa das árvores.
5. Ventilação. As árvores não obstruem a passagem do ar.
6. Albedo. Indicador que mede a refletância das superfícies de um lugar. A presença de áreas vegetadas melhora este indicador, que tem alta relação com o efeito de ilha de calor.

5.4 Brainstorm e estratégias

Segundo Clark (2014) *brainstorm* é uma técnica que permite atacar problemas através do fluxo livre de idéias. Pode ser realizado por uma, duas ou um grupo de pessoas. O resultado, em geral, é apresentado em forma de diagramas e tabelas. Esta técnica foi aplicada em diversas etapas deste trabalho. Primeiro, durante a decomposição do problema, que gerou o diagrama apresentado na “apresentação” (Imagem 01). Segundo, para elencar as estratégias de solução do problema de pesquisa. Esta etapa colaborou com a compreensão metodológica e também no elenco de estratégias para emular os modelos naturais elencados anteriormente. As estratégias de emulação para cada modelo natural identificado estão apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 6. Estratégias de emulação.

Modelo natural	Estratégia
Tricoma	Uso de fibras naturais.

Evapotranspiração	Uso de materiais hidrofílicos.
Fotossíntese	Uso simbiótico, permitindo integração paisagística com o artefato.
Sombreamento	Artefato projetado para permitir sombreamento conforme necessidade.
ventilação	Ser permeável a ventilação.
Albedo	Solução que não prejudique o albedo.

5.4.1 Estratégias aos “Princípios da vida”

Os princípios da vida apresentados no item 1.2.2 da Revisão bibliográfica, também foram utilizados como ponto de partida para estabelecer abordagens da pesquisa. Cada princípio gerou estratégias para o estudo de caso. As estratégias selecionadas tem relação com o gerenciamento das informações da pesquisa e também servem para aprofundar as discussões quanto à função do artefato. A tabela 7 aborda o elenco das estratégias estabelecidas a partir dos “Princípios da vida”:

Tabela 7. Estratégias extraídas a partir dos princípios da vida. Fonte: autora, a partir de *Biomimicry Group* 3.8 (2011).

Princípio	Estratégias adotadas
Evoluir para sobreviver	Revisão de casos anteriores correlatos apresentados na Revisão bibliográfica;
	Formatação do relatório de pesquisa visando documentação do processo, etapas e resultados primários;
	Identificação de prováveis erros dos resultados obtidos;
	Evoluir as abordagens criando novas opções de solução.
Ser eficiente (materiais e energia)	Objetivar uma solução multifuncional;
	Objetivar uma solução bioclimática usando estratégias passivas de condicionamento térmico;
	Objetivar uma solução que permita um processo industrial local e de baixo consumo energético;
	Usar um conjunto de matérias que possa ser descartado no meio ambiente, sem gerar resíduos de baixa degradabilidade;
	Usar princípio geométrico eficiente que economize material.
Adaptar-se as condições de mudanças	Utilizar uma solução que permita variar a funcionalidade de acordo com a necessidade.
Integrar conhecimento e crescimento	Solução modular que permita executar o princípio anterior.
	Sistema modular compatível com mercado nacional;
	Considerar abordagens de Oxman, (2010) quanto à modelagem, fabricação e análise. Objetivar construir um modelo paramétrico que colabore com a solução.
Ser atento e responsivo as questões locais	Estudar os ciclos climáticos de Recife (entender a periodicidade das estratégia bioclimáticas da cidade);
	Estudar a geometria solar de Recife (objetivando entender que tipo de solução é compatível).
	Usar materiais de fácil acesso local;
	Usar materiais com desempenho térmico compatível com clima de Recife.
Usar química amigável a vida	Não usar componentes tóxicos;
	Evitar o uso de petroquímicos.

6 Resultados

Esta etapa apresenta o estudo de caso propriamente dito. Os resultados serão utilizados para produzir indicadores e abrir discussões para pesquisas futuras. De acordo com essa lógica, a descrição dos processos e resultados obtidos permite a identificação de oportunidades de melhoria, ou correções, no caso da ocorrência de desvios. O experimento busca resultados que permitam integração com espaços verdes e possuam química compatível com a natureza, ou seja, que possam ser descartados no meio ambiente. Também será pensado ao mercado regional, considerando tecnologia de produção compatível com a existente, também visa priorizar o uso da matéria-prima local.

Este capítulo está dividido em cinco partes. A primeira, **emulação dos princípios extraídos**, aborda as soluções encontradas para as estratégias elencadas no capítulo anterior. A segunda parte, **construção do modelo paramétrico**, aborda os passos que geram o modelo computacional utilizado. A terceira parte, **modelagem do elemento modular**, aborda a modelagem 3D do elemento proposto para o artefato. A quarta parte, **prototipagem**, aborda as etapas de materialização dos elementos modulares. A quinta e última parte, **avaliação**, apresenta uma comparação do desempenho térmico do material proposto com dois materiais claros e refletantes.

6.1 Emulação dos princípios extraídos

A finalidade desta etapa é emular os modelos naturais e encontrar soluções que obedeçam as funções estabelecidas para o artefato encontrados no item 5 deste trabalho. A intenção é extrair soluções relevantes ao problema de pesquisa. Ou seja, as estratégias estabelecidas no capítulo anterior são utilizadas nesta etapa para colaborar com soluções e premissas de desenvolvimento do estudo de caso. A imagem 52 mostra a taxonomia das soluções elencadas para este experimento. Apresentando o motivo para escolha de cada uma. Por vezes, as próprias estratégias se inter-relacionam, isso reforça determinadas abordagens que o experimento deve considerar prioritariamente. Através do elenco de princípios estabeleceram-se 11 premissas para o estudo dos artefatos geradores de microclima. São eles:

- Uso de fibra de coco;
- Uso de hidrogéis;
- Uso de um sombreados que estabeleça um AVS e AHS, conforme geometria solar de Recife;
- Possibilidade de integrar o artefato com plantas;
- Estabelecer um modelo paramétrico com simulação computacional de incidência de radiação solar;
- Usar ferramentas de e processos prototipagem rápida;
- Usar sistema de elementos vazados com aberturas variadas;
- Usar resinas naturais e flexível;
- Usar voronoi como princípio geométrico;
- Relatar os experimentos em relatório;
- Propor hipóteses para pesquisas futuras.

Contexto

Alta umidade	Regular umidade; utilizar umidade para evapotranspiração.
Alta temperatura e radiação	Minimizar impacto da radiação; Demanda por sombreamento anual Permitir ventilação natural.
Formação de ilhas de calor	Não contribuir para o efeito de ilha de calor.

Modelos naturais

Tricoma	Uso de fibras naturais
Evapotranspiração	Uso de materiais hidrofílicos.
Fotossíntese	Uso simbiótico, permitindo integração paisagística com o artefato.
Sombreamento	Artefato projetado para permitir sombreamento conforme necessidade.
Ventilação	Ser permeável a ventilação.
Albedo	Solução que não prejudique o albedo.

Princípios da vida

Evoluir para sobreviver	Revisão de casos anteriores correlatos apresentados na Revisão bibliográfica;
	Formatação do relatório de pesquisa visando documentação do processo, etapas e resultados primários;
	Identificação de prováveis erros dos resultados obtidos;
	Evoluir as abordagens criando novas opções de solução.

Soluções

- Usar Fibra de coco
- Usar hidrogel
- Usar AVS e AHS, conforme geometria solar
- Possibilitar integração com plantas
- Usar modelo paramétrico integrado a simulação computacional
- Usar ferramenta de fabricação digital: impressão 3D
- Usar cobogós vazados com tamanho de abertura variados.
- Usar bio-resina flexível
- Relatório de pesquisa
- Estabelecer hipóteses para pesquisas futuras
- Usar voronoi como princípio geométrico

Princípios da vida

Objetivar uma solução multifuncional;	Ser eficiente (materiais e energia)
Objetivar uma solução bioclimática usando estratégias passivas de condicionamento térmico;	
Objetivar uma solução que permita um processo industrial local e de baixo consumo energético;	
Usar um conjunto de matérias que possa ser descartado no meio ambiente, sem gerar resíduos de baixa degradabilidade;	Adaptar-se as condições de mudanças
Usar princípio geométrico eficiente que economize material e seja rígido.	
Utilizar uma solução que permita variar a funcionalidade de acordo com a necessidade.	
Solução modular que permita executar o princípio anterior.	Integrar conhecimento e crescimento
Sistema compatível com mercado nacional;	
Considerar abordagens de Oxman, (2010) quanto à modelagem, fabricação e análise. Objetivar construir um modelo paramétrico que colabore com a solução.	Ser atento e responsivo as questões locais
Estudar os ciclos climáticos de Recife (entender a periodicidade das estratégias bioclimáticas da cidade);	
Estudar a geometria solar de Recife (objetivando entender que tipo de solução é compatível).	
Usar materiais de fácil acesso local;	Usar química amigável a vida
Usar materiais com desempenho térmico compatível com clima de Recife.	
Não usar componentes tóxicos;	
Evitar o uso de petroquímicos.	

Imagem 52. Taxonomia das soluções adotadas.

Através do conhecimento, teórico construído durante a condução da pesquisa, iniciou-se o experimento conforme o método, que será relatado a seguir. As soluções apresentadas anteriormente foram usadas para estabelecer quatro etapas de procedimento, os quais serão abordados a seguir, são elas:

1. Construção do modelo paramétrico;
2. Modelagem;
3. Prototipagem do artefato;
4. Avaliação.

O primeiro passo para viabilizar o experimento foi a construção do modelo paramétrico que utiliza ferramentas de *scripting* gráfico. O segundo, de modelagem, também utiliza *scripting* gráfico. O terceiro, prototipagem, utiliza prototipagem rápida com impressão 3D e técnicas de formação para executar protótipos dos artefatos nos materiais idealizados. O quarto e último, avaliação, estabelece um teste térmico preliminar usando técnica de comparação com outros materiais.

6.2 Construção do modelo paramétrico

Para construção do modelo paramétrico foi utilizado o *grasshopper*, plugin gratuito para o Rhinoceros 3D. O modelo no *Grasshopper* foi construído de maneira que haja três *inputs*: primeiro, a modelagem simplificada do entorno imediato. Segundo, o partido arquitetônico estudado para o projeto. E terceiro, os modelos dos elementos de sombra. Ambos podem ser editados no software 3D, ou modelados no *Grasshopper* parametricamente.

O modelo inclui o arquivo climático, simulação de incidência de radiação solar (utilizando o DIVA) e a distribuição dos elementos de sombra. É possível modificar parâmetros dimensionais e avaliar facilmente variações. Esses parâmetros dimensionais dizem respeito à distribuição dos elementos de sombra, quantidade de elementos, escalas de representação, etc (Tabela 8) (imagem 53). Uma vez estabelecidos novos parâmetros, o modelo atualiza automaticamente mostrando um novo cenário. O modelo permite trabalhar com cenários variados e permite aplicação em partidos arquitetônicos não ortogonais e até orgânicos.

Tabela 8– *Inputs e outputs* do modelo gerado no Grasshopper.

Inputs	parâmetros (variáveis)	Outputs
<ul style="list-style-type: none"> • Geometria do partido arquitetônico (editável no software 3D); • Geometria do espaço urbano adjacente; • Elementos de sombreamento modulares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração de distribuição dos brises (profundidade dos brises, e limites de radiação para a distribuição dos brises); • Configurações de malha. Malha usada para simulação e para distribuição dos brises (número de unidades nos eixos “u” e “v”); • Configuração da apresentação da escala de cores da simulação de radiação; • Ligar/desligar o módulo de simulação automática. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição paramétrica dos elementos modulares de sombra; • Simulação de incidência de radiação automática, atrelada ao modelo do partido arquitetônico propostoG

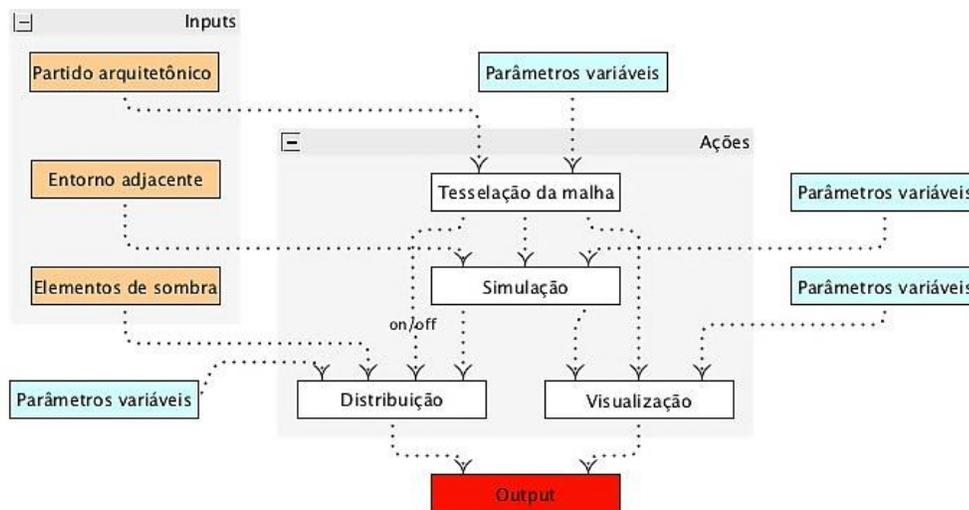


Imagem 53. Funcionamento do modelo paramétrico gerado.

O plugin DIVA para o Grasshoper oferece opções de simulação simplificadas, importantes para considerações nas primeiras fases de projeto. O modelo paramétrico utiliza o módulo de simulação de iluminação, que usa o Daysim como simulador. Na primeira etapa foi inserido o arquivo climático, que passa a fazer parte do modelo paramétrico. Foi incorporado o arquivo com os dados climáticos de Recife no formato .EPW (RORIZ, 2012). O módulo de simulação de iluminação do DIVA oferece seis opções: *Solar Irradiation Nodes*, *Solar Irradiation Image*, *Daylight Factor*, *Illuminance*, *Climate Based* e *Visualization*. A opção utilizada foi a primeira: *Solar Irradiation Nodes*, para o período anual. Esta opção gera uma lista de dados em $\text{Kwh}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$ calculada a partir da construção de uma malha tessellada através do partido arquitetônico.

A malha foi configurada para dar aporte a simulação e a distribuição dos elementos de sombra. O módulo da malha é retangular com dimensões variáveis através dos parâmetros do modelo (eixos UV). A edição desta malha gera uma melhor resolução para simulação e pode ser usada para aumentar a densidade de elementos de sombreado. O modelo é configurado para tessellar a malha através de um determinado partido arquitetônico fornecido pelo modelador. Este partido pode ser elaborado no modelador 3D convencional, ou modelado através de *scripting* gráfico.

Ao associar o partido arquitetônico como *input*, o modelo possibilita visualizar a incidência de radiação na superfície, que pode ser lida concomitantemente a modelagem do partido arquitetônico, facilitando a compreensão sobre a concepção geométrica e seu desempenho (Imagens 54, 55, 56, 57). Ou seja, ao associar o modelo do edifício como *input*, as mudanças na geometria realizadas pelo projetista no software 3D, acompanham automaticamente a visualização de isolinhas que indicam a incidência da radiação do sol sobre a superfície projetada. A visualização da escala de dados também foi configurada e pode ser editada conforme necessidade.

Os dados gerados na simulação em $\text{Kwh}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$ são utilizados para fazer a distribuição dos elementos de sombreado, conforme especificação do modelador (imagem 58). Os parâmetros de distribuição também são editáveis podendo ser utilizado em conjunto com os outros parâmetros para gerar diversos cenários. O modelo também produz dados que facilitam a extração de informação quanto a geometria, por exemplo: a distribuição dos brises é acompanhada da informação da quantidade utilizada de cada um.

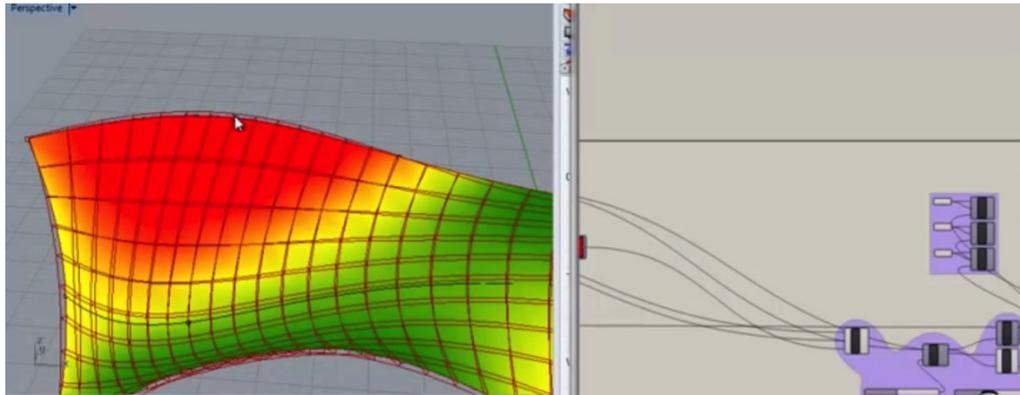


Imagem 54. Modelo usado para teste. Ao associar o modelo 3D como *input*, o modelador passa a visualizar as isolinhas que indicam a incidência de radiação solar na superfície projetada.

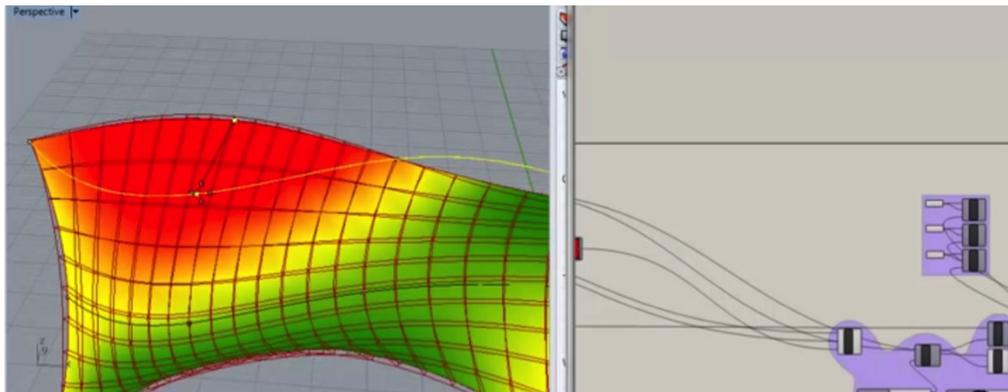


Imagem 55. Edição do modelo visando estabelecer uma forma mais eficiente.

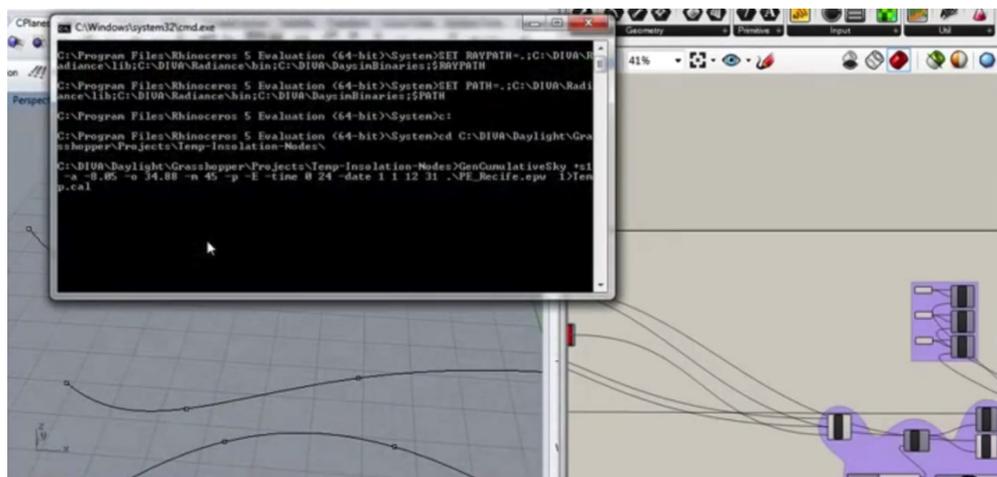


Imagem 56. Ao modificar a forma, o modelo abre uma janela de simulação. Neste caso, esta etapa durou cerca de 2 segundos.

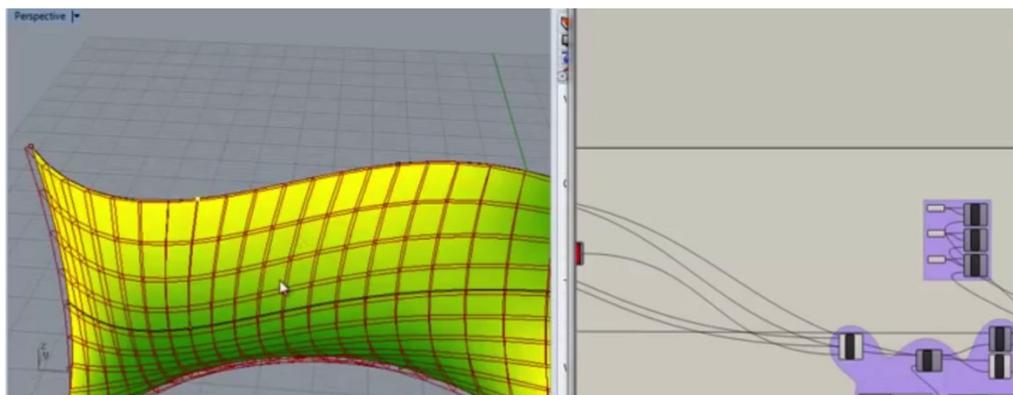


Imagem 57. A simulação integrada colabora com a compreensão do modelo e geração de formas mais eficientes.

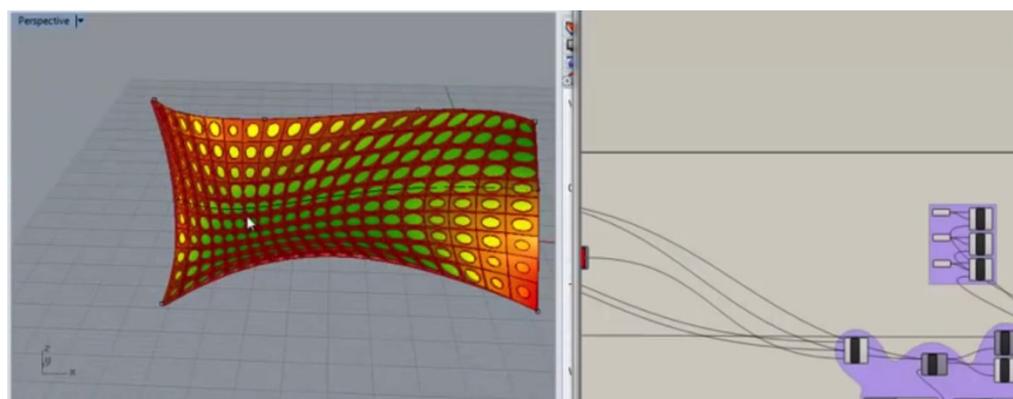


Imagem 58. Após edição da forma, pode-se acionar a distribuição dos elementos de sombra, conforme especificação, associada a simulação computacional.

6.2.1 Modelagem piloto

Para testar o modelo paramétrico criado foi realizado um modelo piloto. Para realizá-lo, primeiramente foi escolhida uma área urbana real de Recife como referência. Em seguida, foi idealizado um edifício vertical com partido arquitetônico cilíndrico, que seria todo sombreado por uma envoltória vazada e refletante.

Foram escolhidos três soluções para os elementos de sombra a partir da leitura da geometria solar de Recife e da distribuição da radiação solar identificada anteriormente na imagem 51. O primeiro, com ângulo de sombreado de 30°, que responde a situações com menor necessidade de sombreado. O segundo, com ângulo de 45°, responde a situações em que a necessidade de sombreado é intermediária. O terceiro, com ângulo horizontal de 60°, utilizada em locais com incidências mais altas de radiação. Todos os elementos também possuem ângulo horizontal de sombreado, para responder a variação do azimute¹² solar durante o ano. Para melhorar a visualização da simulação no modelo 3D, ela foi deslocada a cima do partido arquitetônico. Também foi definido a formatação e edição da legenda (imagem 59).

O modelo permitiu com relativa facilidade gerar diversas alternativas combinadas de densidade de elementos de sombra e tipos de distribuição. Por exemplo, em cerca de 10 min já tinha sido possível avaliar cerca de três alternativas de combinações diferentes. A imagem 60 mostra um dos resultados. Em decorrência do sombreado exercido pela área urbana, foi possível escolher as regiões que poderiam ser dispensadas de elementos de sombreado, as quais poderiam transforma-se na entrada do edifício, pois estavam localizadas na base do edifício. A imagem 61 mostra a redução da radiação incidente em toda envoltória em decorrência da aplicação dos elementos de sombra. Este resultado trás aspectos positivos, tanto para o desempenho termo-energético do edifício, quando para reduzir o efeito de ilha de calor. Já que, se há menos radiação incidindo na envoltória, esta irradiará menos calor para o espaço urbano.

Apesar de ser um estudo preliminar, é possível ver o resultado estético que este tipo de abordagem pode estabelecer. Os elementos de sombra apesar de modulares, possui uma distribuição não linear e provoca um desenho orgânico no decorrer da envoltória. Este tipo de abordagem é encontrado em artigos científicos sob o termo de “envoltórias responsivas”¹³ (*responsive skins/reponsive facade*). Utilizado para definir envoltórias cuja morfologia é gerada através de simulações computacionais de desempenho ou através da interação direta com o clima utilizando sensores. O termo também é encontrado em artigos de automação para elementos de fachada.

A modelagem piloto permitiu estabelecer um modelo-básico que pode ser utilizado em situações futuras (imagem 62). Como permitido por *scripting* gráfico, este modelo pode ter outros modelos paramétricos como *input* e também servir de *input* de outro modelo mais complexo. Também pode ser base para modelos de algoritmo genético¹⁴ ou incluir outros tipos de simulações, como de iluminação e estrutural, por exemplo, criando modelos integrados com multi-simulações.

¹² É o ângulo formado pela projeção horizontal do raio solar com uma direção estabelecida (geralmente o norte geográfico).

¹³ Tradução da autora deste trabalho.

¹⁴ São ciclos automáticos de mudanças das variáveis de um modelo paramétrico/algorítmico visando modelos otimizados.

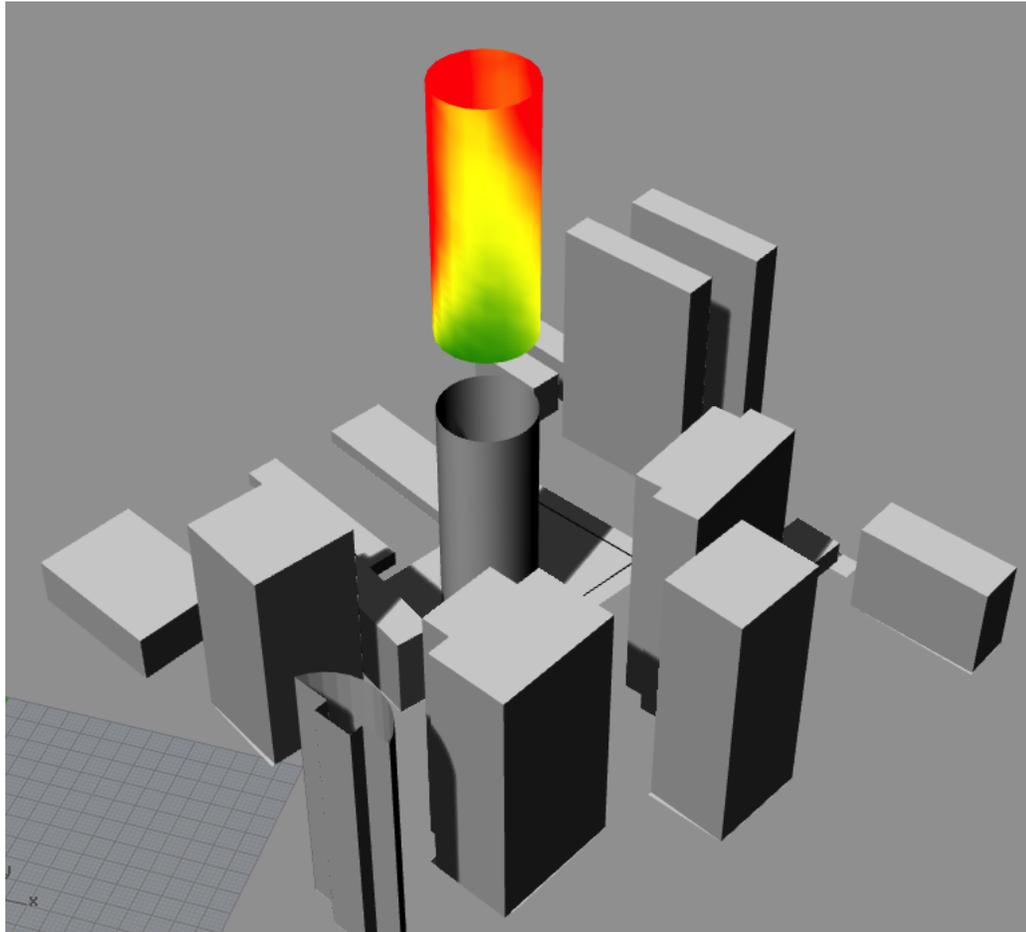


Imagem 59. Modelo gerado mostrando a simulação de incidência de radiação na superfície de um edifício proposto, enquanto o modelador trabalha o partido arquitetônico.



Imagem 60. Resultado formal em pontos de vista sequenciados.

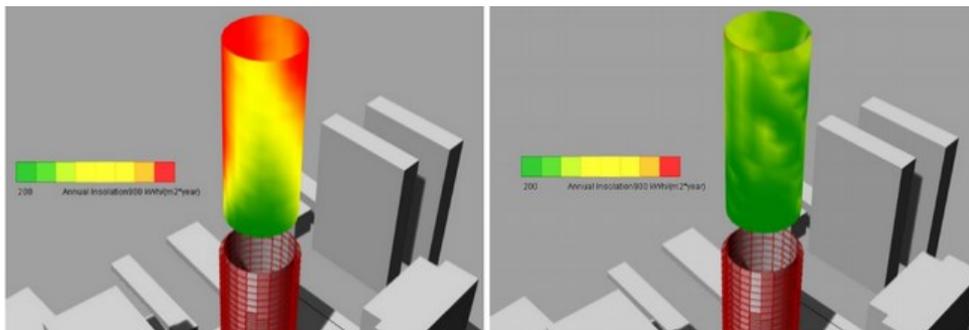
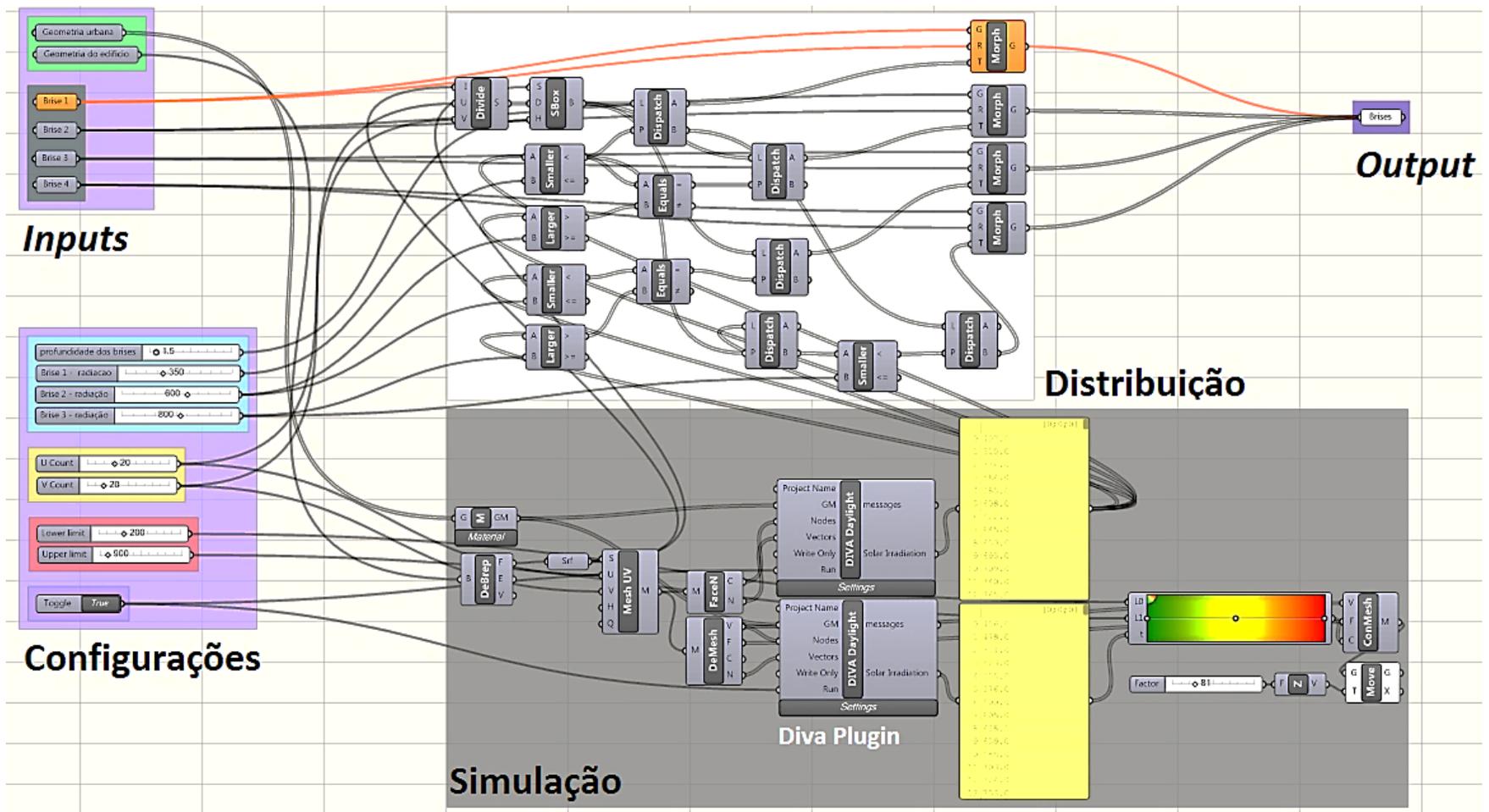


Imagem 61. Simulação mostrando os níveis de radiação incidente antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação dos brises.



. Imagem 62 Script gráfico básico gerado no Grasshopper

6.3 Modelagem do elemento modular

A modelagem utiliza o *Grasshopper* e o *Rhino 3D* como ferramenta. O princípio geométrico utilizado como base do modelo do elemento modular é o voronoi. O voronoi é um diagrama produzido a partir de uma nuvem de pontos. São traçadas regiões para cada ponto, cujo as bordas são equidistantes entre um ponto e outro. Os pontos são os centros de massa de cada região. A razão para escolha, é a de que diagramas de voronoi produzem formas rígidas e eficientes, por isso são encontradas em profusão no meio natural (DU *et al.*, 1999; OXMAN, 2010).

O uso do *Grasshopper* permite de maneira prática elaborar voronois e cria estes diagramas a partir de um conjunto de pontos pré-estabelecidos pelo modelador. Foram locados pontos visando alcançar o percentual de sombreamento desejado para cada elemento, sendo que, os pontos das bordas de cada elemento foram locados de maneira a responder ao sistema modular. Visando a redução de material, o perfil dos elementos modulares é trapezoidal e não retangular. A forma permite usar menos material que a segunda opção e ainda permite uso de fôrmas na reprodução das peças.

O modelo paramétrico permite realizar ajustes de largura e dimensão. Caso a etapa de prototipagem indique a necessidade de ajustes do modelo, estes podem ser realizados sem necessidade de etapas de remodelagem. Os resultados obtidos são três elementos modulares com AVS distintos. O primeiro com ângulo médio próximo de 30°, o segundo de 45° e o terceiro de 60° (imagem 63). Em conjunto formam um diagrama de voronoi complexo que pode ser associado ao modelo paramétrico produzido na etapa anterior para produzir um sombreamento variável. Para ampliar a aplicação, o modelo foi produzido de forma a possibilitar montagem linear ou intertravada (imagem 64).

A forma final alcançada seria de difícil reprodução artesanal, sendo o uso de fabricação digital ideal para a primeira materialização. Os elementos serão prototipados usando os materiais idealizados: a fibra de coco, o hidrogel e uma resina bi-componente de origem vegetal para dar resistência. Ainda visando ampliar o espectro de aplicação, a resina escolhida deve possuir propriedade elástica. O apêndice 1 deste trabalho apresenta proposta selecionada para um concurso internacional demonstrando a concepção dos elementos modulares segundo esses materiais.

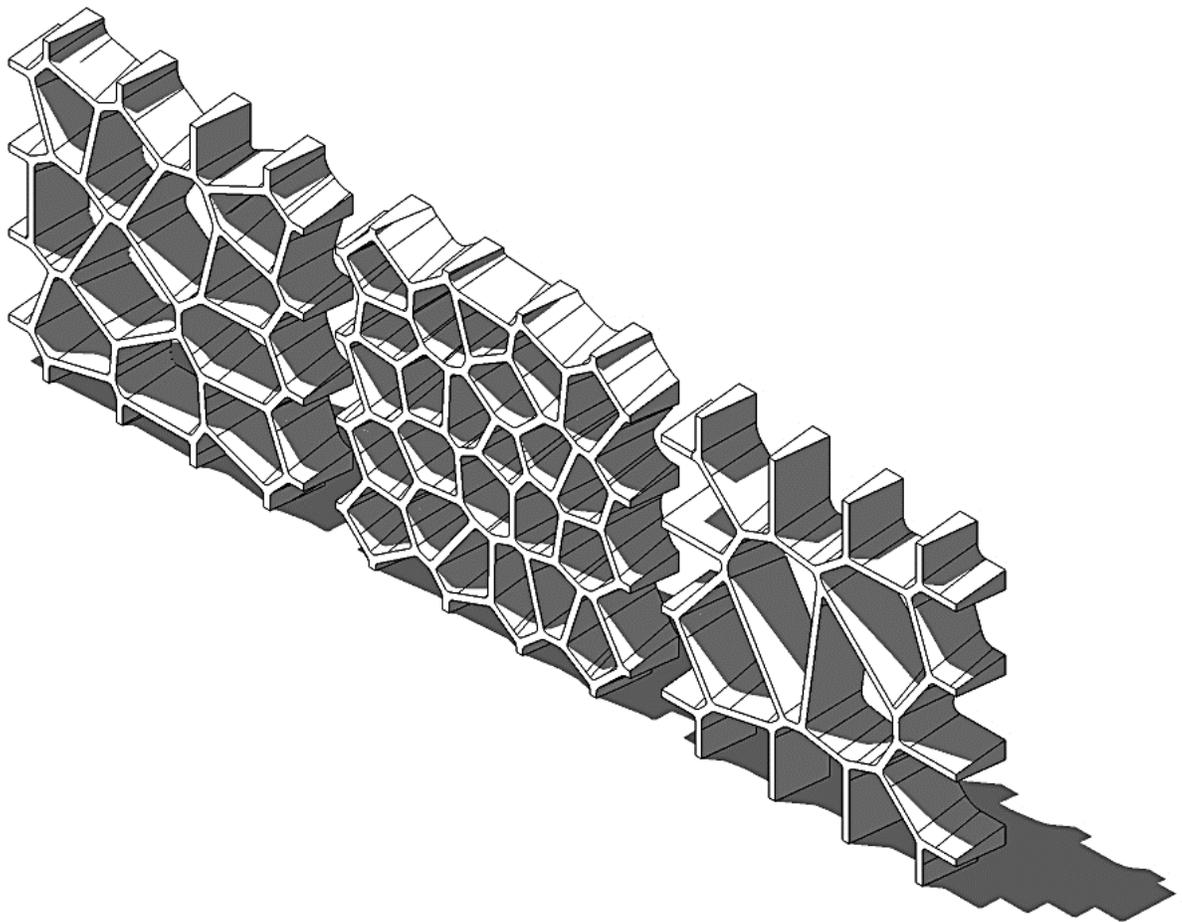
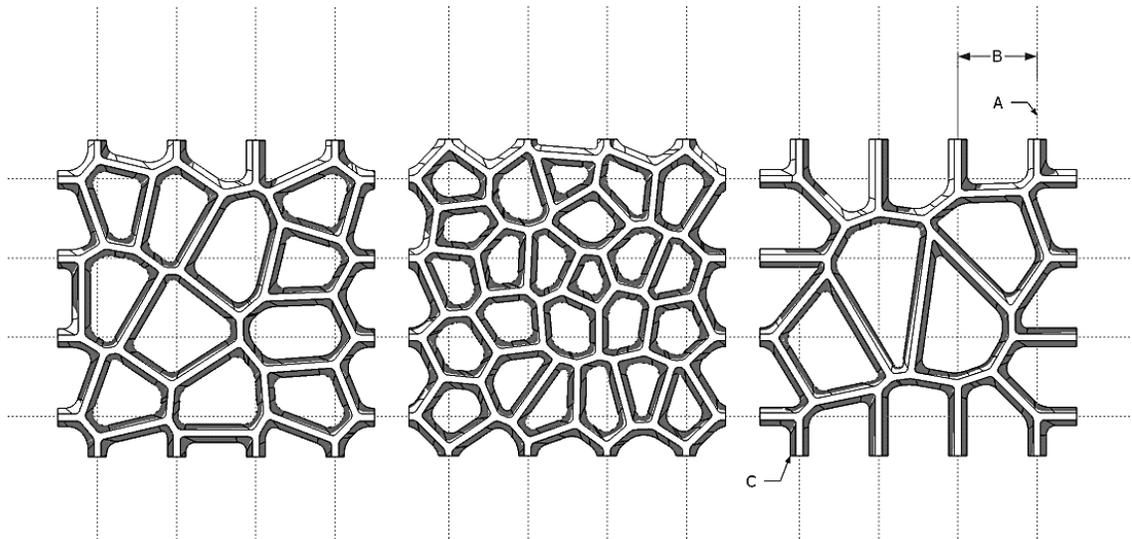


Imagem 63 Modelo dos elementos modulares.

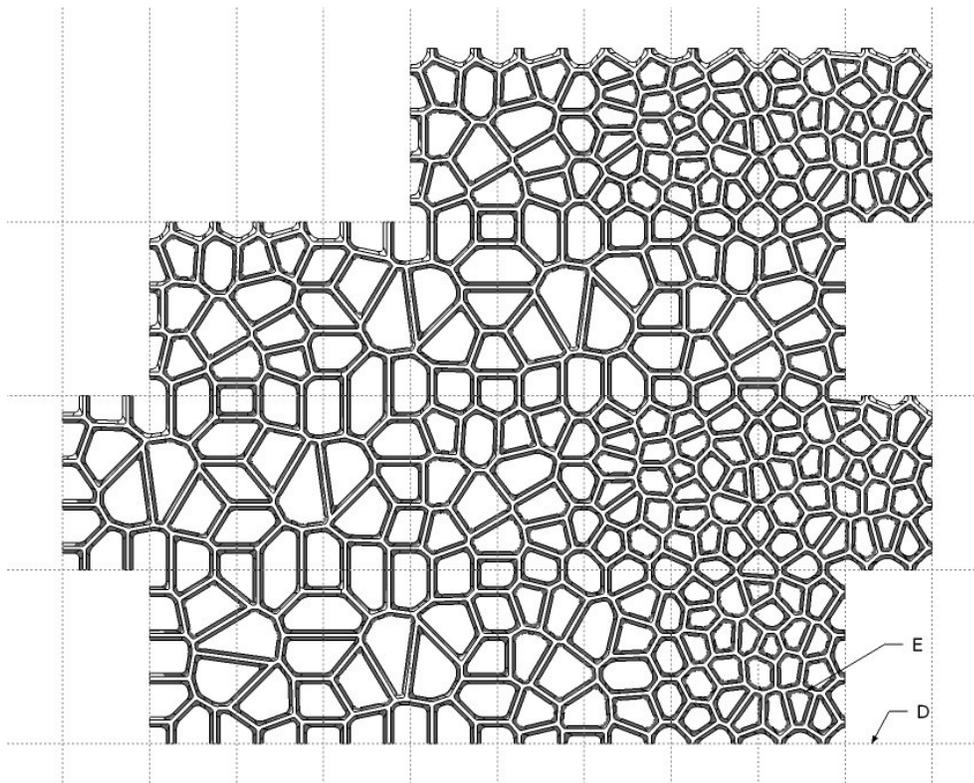
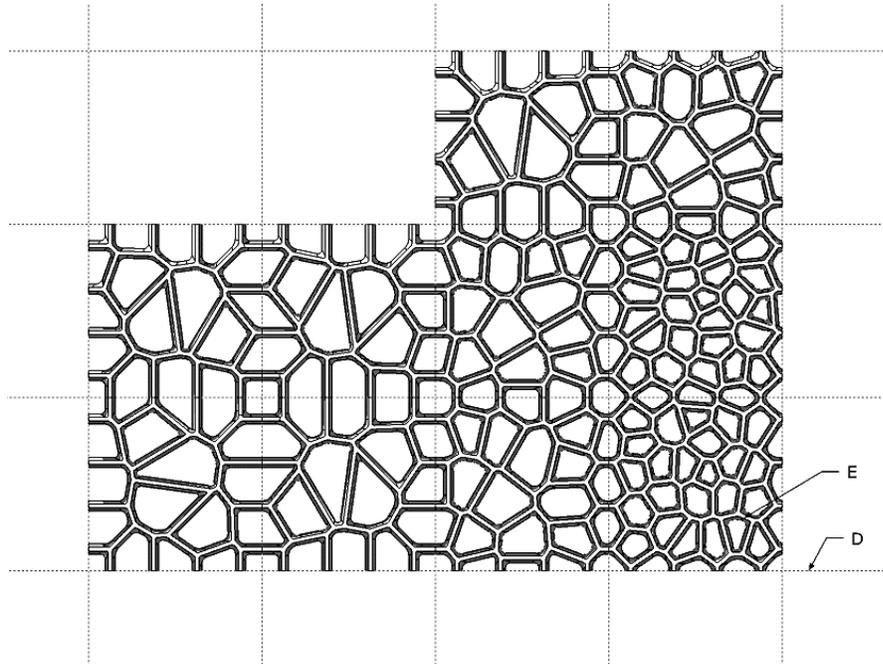


Imagem 64 Montagem dos elementos modulares. A cima, montagem linear, a baixo, Inter travado.

6.4 Prototipagem

A prototipagem é essencial para reduzir as distâncias entre concepção e execução. Neste trabalho, está sendo utilizada para materializar as estratégias elencadas e possibilitar realizar uma avaliação preliminar do artefato. A etapa de prototipagem foi dividida em dois momentos. O primeiro que utiliza técnica de prototipagem rápida utilizando método aditivo usando uma impressora 3D. O segundo intenciona reproduzir os modelos nos materiais selecionados. Este último momento utiliza técnica de formação.

6.4.1 Prototipagem rápida

A impressora 3D utilizada é da marca Z-corporation modelo Zprinter 310 plus. Segundo a empresa, ela utiliza pó e aglomerante e é baseada em uma patente do MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts). A impressora é propriedade do Laboratório de Maquetes (LabMaq) da UFRN, que cedeu o uso para a pesquisa. O Software da ZPrint converte um arquivo com um modelo 3D em outro com seções transversais ou fatias que estão entre 0,0762-0,2286 mm de espessura (dependendo da resolução escolhida para impressão). A impressora imprime estas seções, uma após a outra, a partir da parte inferior do modelo até o topo.

A impressora possui dois reservatórios (um para os insumos e o segundo para o modelo em fabricação) e um eixo de impressão que trabalha em duas dimensões (semelhante a uma impressora jato de tinta convencional). A impressora libera um aglomerante no reservatório do modelo de fabricação, em seguida, este reservatório desce. Um pistão retira uma fina camada de pó do reservatório de pó e espalha sobre o reservatório do modelo. Esta por sua vez, recebe uma outra camada de aglomerante. O processo se faz através de sucessivas camadas, até que o objeto 3D é materializado.

O modelo 3D foi convertido para o formato STL, padrão para uso em ferramentas de fabricação digital, e então enviado ao software da impressora que o converteu em fatias de impressão. Foram impressos objetos em escala de 1:5 (12x12 cm) e 1:4 (20x20cm) (imagens 65 e 66). No primeiro caso, o tempo de impressão foi estimado em 5 horas, no segundo caso, durou cerca de 9 horas. Totalizando 14 horas de processo. Após a impressão é necessário aguardar um período de cura antes de retirar o objeto. Depois de retirado, o objeto segue para uma câmara para ser soprado e aspirado (imagens 67, 68,69 e 70). Este processo retira o pó excedente e o guarda para futuras impressões, evitando desperdícios.

Esta impressora produz objetos relativamente frágeis, os quais necessitam de um mergulho em cianocrilato, que forma uma resina superficial para adquirir resistência. É uma tecnologia que permitiu uma impressão bastante precisa. Em decorrência da fragilidade do pó resinado as impressões desta impressora são adequados apenas para uso em etapas de prototipagem rápida.

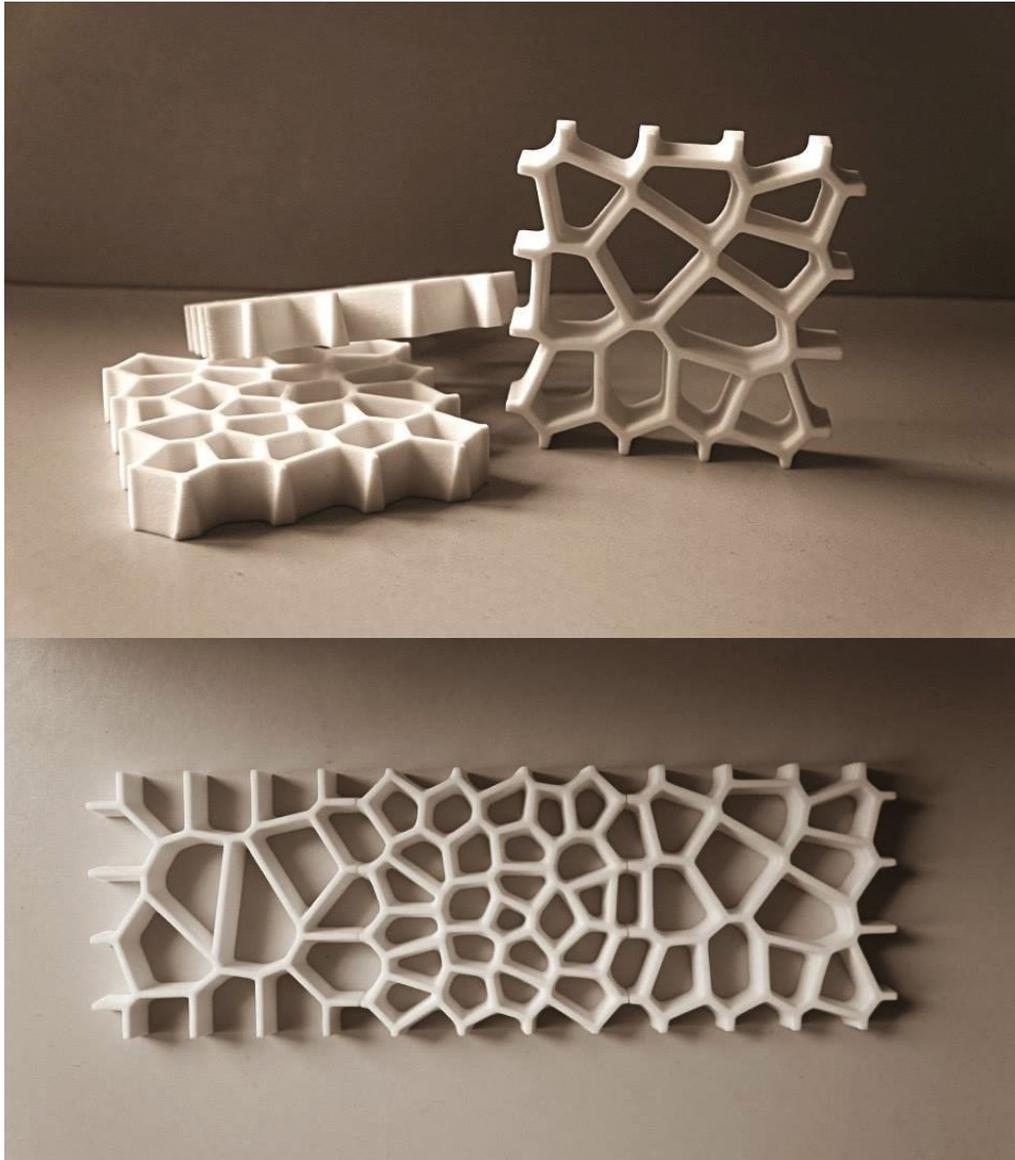


Imagem 65 e 66. Elemento modulares recém impressos.



Imagem 67 e 68. Retirada do elemento impresso do reservatório do modelo.

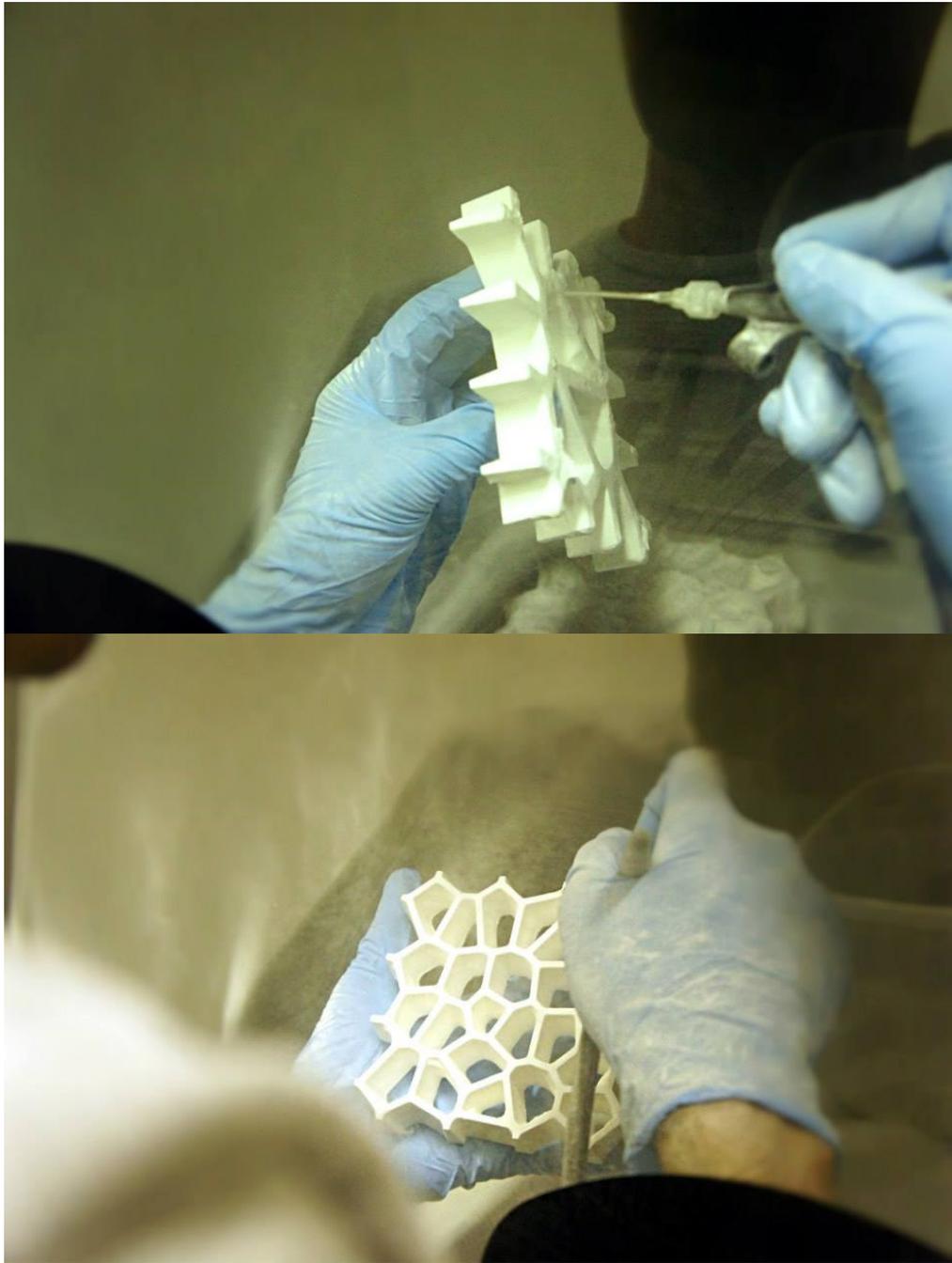


Imagem 69 e 70. Câmara de sopro e aspiração do pó excedente.

6.4.2 Formação

A formação utilizou os modelos impressos como base para fabricação de fôrmas. As fôrmas foram realizadas em silicone industrial. Antes do processo, o silicone é líquido. Ao colocar um reagente, ele inicia o tempo de cura. As fôrmas produzidas podem ser vistas nas imagens 71 e 72. Uma vez produzidas as fôrmas, iniciou-se a etapa de prototipagem visando a reprodução dos elementos nos materiais propostos. O ideal para reprodução era o uso de fôrmas metálicas e uso de prensas industriais para produzir os elementos. Porém para etapa de prototipagem a compressão foi realizada manualmente usando os elementos impressos para comprimir a massa dentro das fôrmas.

Foi utilizada fibra de coco seca e processada para extrair apenas a celulose. Este material já é utilizado abundantemente na indústria paisagística e agrária. A razão para o uso de fibra de coco nessas indústrias é sua conhecida propriedade higroscópica. A fibra absorve umidade do meio ambiente e pode ser utilizada para melhorar as propriedades do solo. Também são resistentes o suficiente para produção de placas, as quais, são utilizadas para fazer vasos, substituir o xaxim e elaborar jardins verticais.

O aglomerante utilizado é uma resina bi-componente a base de óleo de mamona cedida pela empresa Proquinor localizada na região metropolitana de Natal. Estas resinas a base de óleo vegetal são produzidas na empresa desde a década de 70. As resinas são resistentes a altas e baixas temperaturas. Sendo aplicadas atualmente na indústria de telecomunicações, alimentícia (para fabricação de plásticos sem componentes tóxicos), automobilística¹⁵ e náutica. Em entrevista com o diretor da empresa, ele também apresentou aplicações internacionais do uso desses plásticos na indústria da construção civil.

Apesar das vantagens, a resina de óleo de mamona enfrenta problemas políticos no Brasil, que possui um cenário que inviabiliza a produção de plantações de mamona no país. Na última década, a produção foi praticamente extinta. Sendo que, atualmente os bio-plásticos de mamona produzidos no Brasil importa a matéria-prima (o óleo de mamona). A resina e o reagente devem ser misturados a vácuo, sem a presença de umidade. Por essa razão a embalagem possui uma divisão central que permite, uma vez retirada, misturar o composto sem o contato com o ar. A manipulação da resina se deu em uma sala com umidade controlada (imagem 73).

O hidrogel utilizado é o poliacrilato de sódio (imagem 74). É um sal sódico do ácido poliacrílico. Este composto tem a capacidade de absorver água em uma proporção entre 200 a 300 vezes o valor de sua massa. Segundo Sandonato (2011), esses polímeros superabsorventes possuem um período de meia vida de 5 a 7 anos na natureza. As conclusões de sua pesquisa demonstram que este polímero tem propriedades de biodegradação. Este material também é utilizado na indústria agrária para melhorar as características de solos e reduzir o efeito de períodos de seca. Também é largamente utilizado como absorvente de líquidos em fraldas descartáveis.

A mistura da resina e da fibra de coco se deu de maneira a preservar as propriedades da fibra, não foi colocado resina a ponto de impermeabilizar completamente a fibra. Entre camadas de fibra com a resina foi adicionado o hidrogel, que não estava hidratado. O resultado é elementos resistentes e leves que podem ser deformados possibilitando uso em superfícies com curvaturas (imagens 75, 76 e 77).

¹⁵ A empresa realizou pesquisas com a Mercedes da Alemanha na década de 90 substituindo todos os plásticos de um veículo. A medida foi adotada pela Mercedes.



Imagem 71 e 72. Fôrmas de silicone. Fonte: autor.

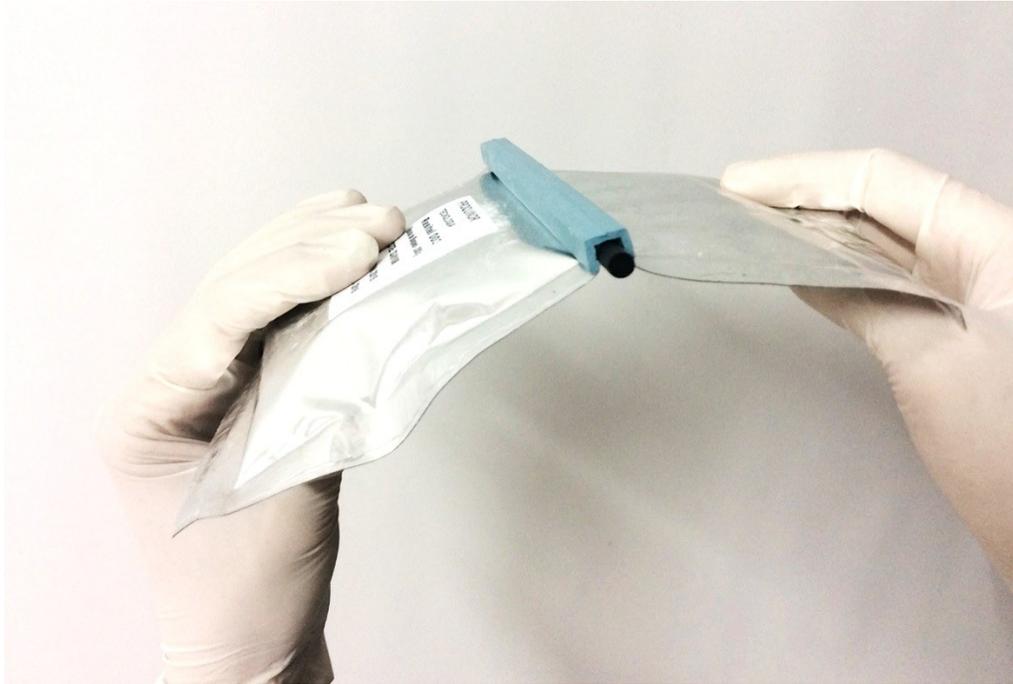


Imagem 73 Resina bi-componente de óleo de mamona. Fonte: autor.



Imagem 74 Poliacrilato de sódio não hidratado e hidratado. Fonte: autor.



Imagem 75 Elemento recém retirado da fôrma, ainda sem acabamento. Fonte: autor.



Imagem 76 e 77 A esquerda, elemento ao ser retirado da fôrma. A direita, as propriedades da resina permite curvatura do elemento. Fonte: autor.

6.5 Análise dos materiais

A etapa de avaliação foi realizada no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LabEme) da UFPB conforme especificado no capítulo dos procedimentos metodológicos. O levantamento durou cerca de 140 minutos, os sensores obtiveram neste período dados de temperatura superficial por segundo. Foram produzidos três corpos de prova nas dimensões de 22x22 cm. O primeiro de gesso comum, o segundo o composto gerador de microclima proposto pela pesquisa e o terceiro um cimento branco (imagens 78 e 79). Ambos os materiais frutos da comparação são brancos e possuem uma alta refletância. São materiais com propriedades, em geral, recomendadas em pesquisas sobre efeito de ilha de calor, pois possuem superfície lisa e de cor clara.

O composto proposto pela pesquisa, por sua vez, é amarronzado. Uma vez que ele permite uso híbrido com plantas, as propriedades de refletância melhoram. Porém para a avaliação foi considerado apenas o efeito da umidade e evaporação, sem uso de cobertura verde. Antes do teste foi utilizado um borrifador de água. Foram borrifados cerca de 90 ml de água. O hidrogel permite absorção da água sem que ela fique escorrendo ou deixe o corpo de prova com aspecto de molhado.

Foram coletados dados por segundo, durante 140 minutos de aquecimento. O resultado mostra que até os primeiros 20 min o efeito da evapotranspiração parecia ainda não influenciar o desempenho do bloco testado. Em detrimento disso os blocos refletantes tinham desempenho semelhante e melhores. Depois desse período, o bloco com o composto proposto passou a funcionar melhor. A temperatura superficial em contato com a fonte de calor teve comportamento irregular, mas foi melhor que os refletantes, aqueceu menos e preservou as propriedades no período de teste. Enquanto os outros aqueceram e transmitiram mais calor.

O resultado pode ser visualizado no gráfico 01. A linha vermelha é a temperatura radiante dentro da sala aquecida. As linhas verdes são referentes aos sensores da fibra de coco com o hidrogel (um está do lado aquecido e o outro do lado não aquecido).

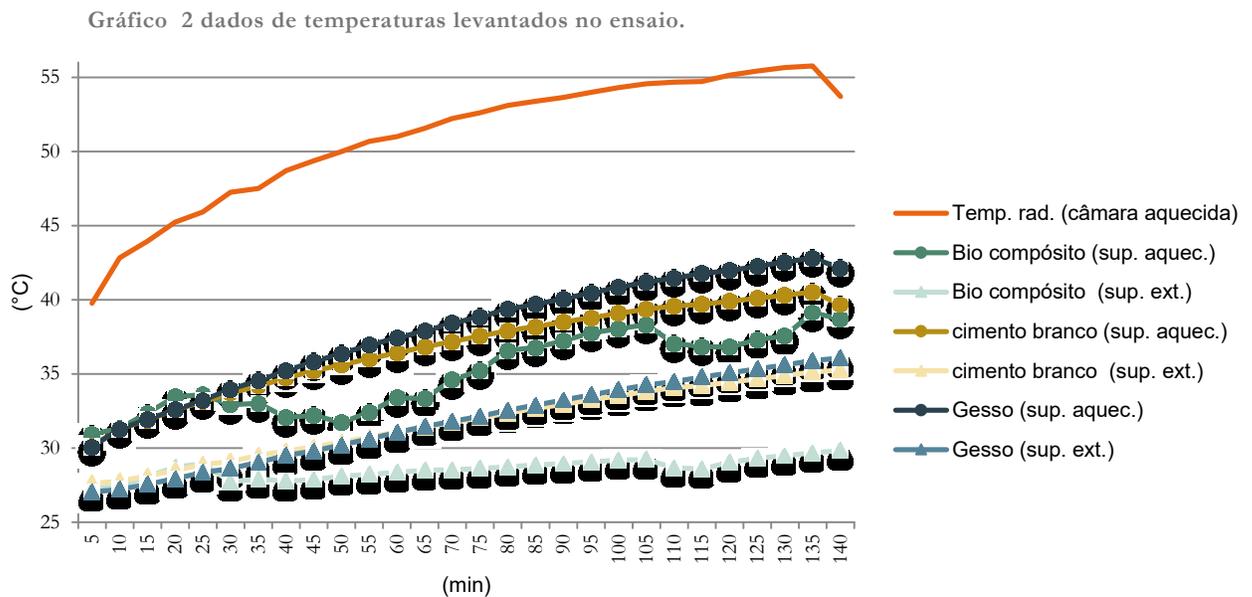




Imagem 78 e 79 Ensaio térmico. A cima é mostrado as superfícies em contato com a fonte de radiação. A baixo, as superfícies opostas.

Também foram tiradas fotos de infravermelho durante o experimento. As fotografias no início do experimento, demonstram o que foi dito anteriormente. Os blocos brancos estavam melhores no início (apenas nos primeiros 20min). Provavelmente, devido sua alta refletância. Já do lado oposto, fora da câmara aquecida, o bloco com composto proposto permaneceu fresco, enquanto os outros esquentaram e conduziram calor (imagens 80 e 81). Após este período inicial, o bloco com hidrogel apresentou tendência maior a preservar a temperatura superficial, chegando em momentos que apresentou até 4°C a menos de temperatura na superfície exposta a radiação. Os dados medidos no lado indicaram que o material isolou mais o calor que os outros materiais (imagens 82 e 83).

O teste realizado indica potenciais positivos do uso da evaporação como forma de reduzir a influencia do calor. Porém, são necessários testes subsequentes para identificar numericamente às propriedades térmicas. Também é importante regular a quantidade de hidrogel necessária considerando características como: o regime de chuva e o efeito ideal buscado. Vale salientar que as propriedades térmicas podem ser melhoradas considerando a possibilidade de uso híbrido do material com plantas (semelhante a um xaxim), podendo ter potencial de utilização também, uma vez desenvolvido, em técnicas de fitorremediação¹⁶ do ar em espaços.

¹⁶ Trata do uso de plantas para remover ou tornar inofensivos ao ecossistema, contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes no ar, solo ou na água.

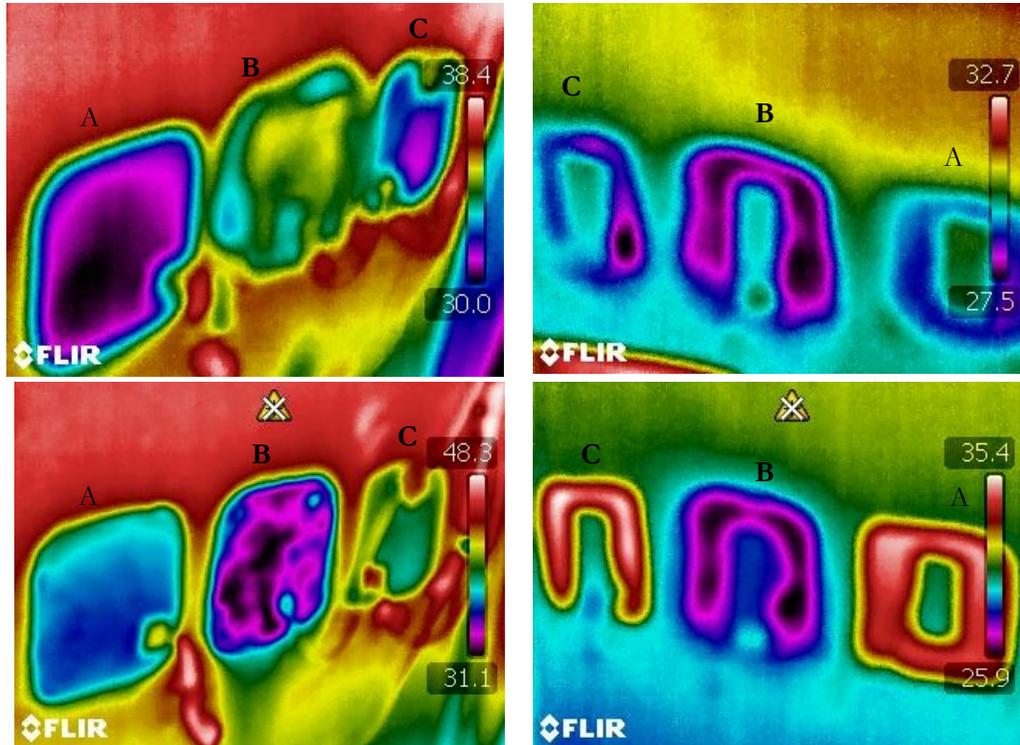


Imagem 80, 81, 82 e 83. Imagens de infravermelho do ensaio. De cima para baixo: As duas primeiras fotos foram tiradas durante os primeiros 10 min de experimento. A foto da esquerda mostra as superfícies em contato com a radiação. A foto da direita mostra o lado oposto. As fotos de baixo mostram o ensaio após duas horas de experimento. A letra que identifica o material proposto na pesquisa é a “B”.

7 Considerações finais

Este trabalho objetivou investigar o potencial da integração entre parametrização da forma, prototipagem rápida e preceitos biomiméticos, em resposta a questões bioclimáticas. O trabalho investiga esta integração através do estudo de caso de um artefato gerador de microclima para o clima quente e úmido, utilizando a cidade de Recife como referência. De maneira geral, a pesquisa cumpriu o objetivo geral e apresentou um processo que aplicou uma metodologia que visa processos bioinspirados. O estudo de caso evoluiu até a etapa de prototipagem, que possibilitou realizar um teste de desempenho térmico usando método comparativo para avaliar potenciais dos princípios estabelecidos.

A revisão bibliográfica contribuiu com a compreensão da decomposição do tema da dissertação e clareza das temáticas abordadas. A partir da revisão bibliográfica é possível identificar o link que pode ser estabelecido entre abordagens como a biomimética, bioclimatologia, parametrização da forma e prototipagem rápida aplicados ao design de edifícios. A bioclimatologia se integra, e é complementar aos preceitos da biomimética. Os processos algorítmicos e de parametrização são um meio que possibilita computar ligações e simulações que podem dar aporte a geração de geometria inspirada pelo desempenho. A prototipagem rápida e as ferramentas de fabricação digital possibilitam materializar geometrias complexas frutos das explorações anteriores.

A revisão bibliográfica e das pesquisas no estado da arte também contribuíram para a compreensão do fenômeno do efeito de ilha de calor. Esta compreensão com base em pesquisas anteriores foi fundamental para estabelecer estratégias, mesmo as relacionadas a emulação de modelos naturais. As pesquisas realizadas identificam que esta área ainda demanda de muitas pesquisas que visam compreender meios para mitigar o efeito negativo das construções no desempenho térmico urbano e exploração de novos materiais.

Algumas considerações específicas serão abordadas a seguir. A divisão de temas a serem abordados se deu conforme os objetivos específicos do trabalho. São eles: considerações sobre a metodologia desenvolvida pelo *biomimicry group* 3.8; sobre as estratégias selecionadas para mitigação do efeito de ilha de calor; considerações sobre o processo de parametrização e as considerações sobre o processo de prototipagem e análise. As conclusões que se seguem dizem respeito ao estudo de caso, ou seja, não são generalizadas para além do escopo do trabalho. Ao final, de cada tópico são indicadas as limitações encontradas nas abordagens e as algumas possibilidades para pesquisas futuras.

7.1 Sobre a metodologia desenvolvida pelo Biomimicry group 3.8

Os métodos tradicionais de produção e efficientização do consumo de energia obtiveram no passado resultado satisfatório, porém atualmente a sociedade moderna se confronta com fatores adicionais que devem ser contabilizados como a escassez de recursos, as emissões de gases e os efeitos sobre as mudanças macro e microclimáticas. Estes desafios significam que há uma necessidade crescente de abordagens inovadoras. Já existem alguns exemplos de abordagens existentes, tais como design passivo da eficiência energética dos edifícios e eficiência crescentes de produção de energia renovável (bioclimatologia). Estes fatores podem ser

acrescidos de abordagens bioinspiradas como estratégia para acrescentar melhorias ainda mais significativas nas abordagens.

A metodologia proposta pelo biomimicry group 3.8 colaborou significativamente no processo da pesquisa. A partir da tentativa por cumprir os ideais, princípios e etapas propostas pela metodologia foi possível estabelecer um processo de construção da solução com base em evidências e não apenas em repetição de soluções anteriores. A metodologia colabora com considerações quanto a sustentabilidade da proposta e também introduz uma compreensão do funcionamento do ecossistema e contribui com o estudo de sua emulação para processos humanos.

Nesta pesquisa foi possível identificar vantagens de sustentabilidade considerando uma abordagem bioinspirada. A principal vantagem é associação da decomposição da problemática com os princípios da natureza. Através da associação proposta foi possível integrar soluções que abordam diversos níveis de complexidade que vão desde a concepção e fabricação, até a integração microclimática, de saúde e do descarte. Neste caso contribuiu com a ampliação do escopo abordado na fase de programação e problemática. Ou seja, abordagem bioinspirada através da metodologia colaborou com compreensão de uma abordagem mais holística.

7.2 Sobre a emulação de soluções da natureza para mitigação do calor

Através de bilhões de anos de evolução, a natureza tem gerado interações sistemas e substâncias que fizeram a vida na terra ter as características atuais. Em contraposição o processo humano de fabricação e inclusão de sistemas e artefatos artificiais frequentemente desconsidera sua inserção dentro de um ecossistema. Uma abordagem com potenciais para reduzir esta distancia é o estudo do funcionamento de elementos naturais como inspiração de design.

É sabido que a integração com o paisagismo é uma das estratégias mais eficientes para a mitigação do efeito de ilha de calor. A abordagem da pesquisa indica potenciais alternativas para integração paisagística no design de edifícios. Além disso, este trabalho considerou estratégias de emulação de princípios extraídos a partir do estudo de sobre como as arvores resfriam seu entorno. Esta etapa foi bem sucedida e através dela foi possível identificar princípios que foram cruciais para o bom andamento do trabalho. A emulação utilizou revisão de pesquisas anteriores que abordavam a morfologia de árvores afim de compreender seu processo de resfriamento. A partir desta abordagem foram selecionados seis características que relacionadas ao efeito estudado:

1. Presença de tricoma em forma de fibra. Este tecido morto se apresenta em alguns casos em forma de fibra e colabora com a redução da temperatura superficial da folha através de sua interação com a água. As fibras naturais absorvem água da umidade do ar e o processo de evaporação colabora com a redução superficial de temperatura.
2. A fotossíntese, que reduz a influencia da radiação, a qual é convertida em energia bioquímica.
3. O processo de evapotranspiração que colabora com a redução da temperatura superficial, já que as folhas armazenam agua e sua liberação aumenta o efeito de evaporação.
4. Albedo. Indicador que mede a refletância das superfícies. A presença de áreas vegetadas melhoram este indicador, que tem relação intrínseca com o efeito de ilha de calor.
5. Sombreamento

6. Ventilação. Quanto a ventilação e o sombreamento, as árvores permitem a circulação do ar e estabelecem sombra, responsáveis por criar um microclima abaixo de sua copa. Essas duas estratégias já são identificadas como as principais estratégias bioclimáticas para climas como o de Recife.

As pesquisas sobre materiais para mitigação do efeito de ilha, em geral, abordam as propriedades óticas dos materiais, como a absorvância e emissividade. A abordagem deste trabalho considera estratégias que utilizam propriedade hidrológicas, que obtiveram resultados preliminares positivos na comparação com dois materiais brancos. Esta abordagem está em concordância com trabalhos apresentados por Yeang (2006) e (YANG *et al.*, 2015), ambos recomendam como opção estratégica o uso de mudança de fase de materiais (no caso aqui, a água) e uso de superfícies permeáveis em conjunto com as abordagens óticas dos materiais.

7.3 Sobre o processo de parametrização

O estudo de caso descrito explora, através de uma abordagem paramétrica e algorítmica, o design responsivo aplicado a questões de eficiência energética e considerações bioclimáticas. Na aplicação são utilizadas, de forma integrada numa única interface, ferramentas interoperáveis de modelagem geométrica, simulação e de programação gráfica. O estudo caracteriza ainda um processo que pode facilitar a produção de elementos de sombra paramétricos conforme entorno, clima e latitude, ainda aborda a facilidade de extração informações do modelo, em curtos intervalos de tempo.

Em termos de processo, o estudo de caso apresenta possibilidades de integração com simulação em etapas preliminares do design. Em geral, processos tradicionais de projeto incorporam considerações numéricas apenas em estágios mais avançados. Ferramentas paramétricas e algorítmicas podem ser um meio utilizado para diminuir a distância entre simulação de desempenho e estabelecimento de geometria/solução. *Scripting* gráfico, por sua vez, facilita uso de abordagens algorítmicas por profissionais de projeto (designers e arquitetos) que não necessariamente conhecem programação através de linguagem de texto e pode ser entendida como uma “interface amigável”.

A incorporação de ciclos avaliativos ao processo de projeto, associado ao design responsivo, permite maior liberdade para ajustes e elaboração de combinações variadas como resposta a um mesmo problema. Esta combinação acaba por expandir o controle do usuário frente aos limites impostos pelas ferramentas de modelagem e simulação tradicionais. Colaborando com a compreensão do projetista, e computando padrões que podem ser utilizados para estabelecer soluções.

Em termos de potencial de exploração, os processos paramétricos e algorítmicos oferecem oportunidades inalcançáveis por processos tradicionais. Dentro de uma mesma solução geométrica, os parâmetros estabelecidos pelo designer permitem a exploração de múltiplas alternativas praticamente em tempo real. Além disso, existe o potencial de variar soluções dentro de um mesmo modelo paramétrico. Por fim, a possibilidade de reutilização do modelo em outras situações de projeto, indica de forma exponencial os benefícios destas abordagens.

Processos algorítmicos podem contribuir para melhorar processos projetuais, pois reduzem influências advindas de limitações das ferramentas tradicionais, pois “libera” o projetista para planejar o processo paramétrico a ser incorporado em seu projeto. Apesar do uso de *scripting* gráfico não requerer conhecimento específico de programação por via de código, esta abordagem ainda requer conhecimento específico e compreensão da lógica de programação. Porém é uma abordagem mais acessível a arquitetos.

7.4 Sobre a construção de protótipos e análise.

Em decorrência da complexidade encontrada em relacionar questões de bioclimatologia e biomimética em resposta a questões urbanas contemporâneas, houve o entendimento da necessidade de abordagens que levassem em consideração uso de máquinas CNC nos processos de materialização. A fabricação digital e o avanço tecnológico das tecnologias que não descaracteriza necessariamente as discussões de sustentabilidade. Porém podem acender alertas que merecem discussão, a exemplo de prováveis consequências da popularização da fabricação pessoal.

O objetivo desta etapa foi materializar as estratégias elencadas nas etapas de problematização e concepção, afim de compreender a possibilidade de concretizar as estruturas propostas utilizando biomateriais. Também foram elaborados corpos de prova afim de realizar um teste térmico utilizando método de comparação entre o material proposto e outros com alta refletância. Ambas as etapas foram consideradas bem sucedidas.

O trabalho evoluiu até a etapa de prototipagem, que foi uma importante etapa para a verificação da possibilidade e investigação das estratégias proposta pelo estudo de caso. Desde os primeiros estágios até os mais avançados, a prototipação digital ou não ajuda a averiguar resultados quanto ao desenvolvimento de um artefato. A prototipação também pôde ser utilizada como um canal que facilitou compreensão e comunicação da proposta, facilitando a verificação de possíveis ajustes e discussões em grupo. Concluindo, a etapa de prototipação foi essencial para o andamento da pesquisa.

A prototipação ocorreu em duas etapas: a prototipagem rápida e a formação. A primeira possibilitou materializar os elementos modulares idealizados. A impressão 3D, que utilizam técnicas aditivas podem ser utilizadas a fim de evitar produção de resíduos nestas etapas. Além disso, dificilmente a execução dos elementos modulares seria possível por meio artesanal em pouco tempo. Já usando prototipagem rápida, em cerca de 14 horas de trabalho foi possível imprimir 6 elementos. Três com a escala de 1:5 e 3 com escala de 1:4. A etapa de formação, por sua vez, possibilitou executar os protótipos nos materiais idealizados, já que as ferramentas digitais com processos de adição (impressoras 3D) não permitem muitas opções na escolha de materiais. Ou seja, apenas por via de formação foi possível a execução do protótipos conforme idealizado.

Os testes térmicos preliminares realizados obtiveram resultados promissores. O uso de hidrogéis foi importante para obtenção dos resultados positivos. Através do uso do hidrogel, o corpo de prova conseguiu aumentar sua absorção de água, e durante o tempo de teste preservou as propriedades. O hidrogel foi considerado uma boa estratégia para utilizar a transpiração da água como meio de se obter resfriamento, pois ele permite a absorção e reserva da água sem deixar o artefato molhado ao toque.

Os testes indicaram que a união de materiais como o hidrogel e a fibra de coco que possui uma absorção mediana e uma alta rugosidade, pode desempenhar melhor que materiais refletantes, como o gesso e o cimento branco. Os resultados indicam potenciais para estudo de estratégias alternativas de materiais visando a mitigação do efeito de ilha de calor. Considerando a matéria prima de origem vegetal, o trabalho indica possibilidades para produção de materiais de baixo impacto para construção civil.

7.5 Limitações encontradas e considerações para pesquisas futuras

A metodologia do Biomimicry3.8 (2011a) é proposta para ser utilizada em todas áreas de produção humanas. Apesar desta pesquisa não comportar, abordagens sociais e econômicas não foram excluídas do processo. Pesquisas futuras podem abordar implicações da metodologia nesses aspectos no que diz respeito a processos de produção integrados, multidisciplinares, e formato de equipes de trabalho.

Outras duas abordagens que podem ser consideradas em pesquisas futuras são: a comparação de metodologias bioinspiradas, e a descrição de mais aplicações de estudos de casos com esta metodologia. Comparações com metodologias distintas poderiam colaborar com a adição e melhorias de processos bioinspirados. Outros estudos de caso adicionariam pontos de vista distintos sobre a aplicação desta metodologia.

As características das plantas selecionadas podem colaborar com abordagens de pesquisa que visam mitigação do efeito de ilha de calor. Porém as estratégias de emulação selecionadas por esta pesquisa não são exaustivas. Outras estratégias poderiam ser selecionadas em concordância com pesquisas e as características selecionadas. Como alguns exemplos podem-se citar: a integração com produção de energia fotovoltaica e integração das estratégias utilizando materiais com propriedades óticas mais favoráveis, como a alta refletância. Ambas as abordagens podem ser consideradas em pesquisas futuras.

Além da abordagem anterior, futuras pesquisas sobre desempenho de materiais podem considerar propriedades que se sobressaiam as características óticas a exemplo da abordagem empregada neste trabalho. Outros modelos naturais poderiam ser utilizados como inspiração para emular estratégias. Além disso, é possível elaborar diferentes abordagens as estratégias elencadas neste trabalho.

O uso de abordagens algorítmicas, mesmo as que utilizam *scripting* gráfico, faz necessária familiaridade com pensamento matemático e seu rebatimento em geometria, bem como, capacidade de organização e caracterização de processos e modelos. Entende-se que as tecnologias disponíveis para o desenvolvimento de soluções arquitetônicas estão em constante evolução. O uso destas tecnologias com vistas ao avanço da prática profissional pode ser componente importante para o aprimoramento de determinadas etapas no design de edifícios. Nota-se que são imprescindíveis abordagens integradas de projeto e modelagem, além da incorporação de ciclos avaliativos a estes processos.

Trabalhos futuros podem abordar o desenvolvimento de modelos com multi-simulações integradas numa mesma interface, além de exercícios acadêmicos que incorporem aplicações como a apresentada em sala de aula. A transformação da prática profissional, em respostas ao cenário atual da produção arquitetônica nacional, passa necessariamente pela revisão da formação do arquiteto e demandas sobre a prática. Isto é, cabe discutir como tais questões farão parte da formação contemporânea dos arquitetos e urbanistas, bem como das revisões das normativas e legislações vigentes.

Algumas limitações foram encontradas na etapa de prototipagem, a primeira, relacionada ao acesso de laboratórios que possuíam ferramentas de fabricação digital na região Nordeste do Brasil. A pesquisa obteve acesso à impressora 3D do Departamento de Arquitetura da UFRN que foi crucial para o trabalho. Em decorrência da escassez de opções de máquinas, a construção dos protótipos teve que considerar limitação para reprodução das peças, pois a área de impressão era limitada a dimensão de 22 x 22 cm.

O acesso a diferentes tipos de hidrogéis não foi possível durante a pesquisa. Sendo que a escolha do hidrogel usado, o Poliacrilato de sódio, se deu por ser amplamente utilizado na indústria agrária, dentre outras e por possuir informações quanto a sua duração na natureza. Considerando que Rotzetter et. all (2012) indica diferenças de desempenho térmico entre hidrogéis distintos, a pesquisa não aborda necessariamente a escolha ideal a proposta da pesquisa. Por tanto, pesquisas futuras podem abordar a aplicação de diferentes hidrogéis em climas tropicais visando sua integração com artefatos arquitetônicos. Destaca-se a necessidade pela caracterização de seus desempenhos térmicos e formas de implementação em artefatos.

Quanto aos testes térmicos, apesar dos resultados preliminares positivos, o trabalho tem abrangência com base em um estudo de caso. Ainda se faz necessário mais pesquisas para o aprofundamento das abordagens. Pesquisas futuras podem ser realizadas com finalidade de aprimorar a aplicação da fibras, da resina de origem vegetal e de hidrogéis com vistas ao estudo de propriedades térmicas ótimas e dosagem adequada ao clima do litoral nordestino. Também se faz necessário estudar a integração do artefato proposto a diferentes plantas, a fim, de caracterizar diferenças de microclima e outras melhorias possíveis.

8 Referências

ALEXANDER, C. et al. **A pattern language which generates multi-service centers**. Berkeley, Calif.,: Center for Environmental Structure, 1968. 283 p.

ASHRAE, S. Standard 55-2010. **Thermal environmental conditions for human occupancy**, 2010.

BAR-YAM, Y. **Dynamics of complex systems**. Addison-Wesley Reading, MA, 1997.

BARRIOS HERNANDEZ, C. R. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 309-324, 5// 2006. ISSN 0142-694X. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142694X05000876> >.

BENYUS, J. M. **Biomimicry : innovation inspired by nature**. 1st. New York: Morrow, 1997. 308 p. ISBN 0688136915 (alk. paper).

BIOMIMICRY3.8. Biomimicry Thinking. 2011a. Disponível em: < <http://biomimicry.net/about/biomimicry/biomimicry-designlens/biomimicry-thinking/> >. Acesso em: 03/03/2014.

_____. Life's principles. 2011b. Disponível em: < <http://biomimicry.net/about/biomimicry/biomimicry-designlens/lifes-principles/> >. Acesso em: 03/03/2014.

BORBOLLA, R. P. **Topography Faces**. Iaac institute for advanced architecture of Catalonia 2013.

CELANI, G.; VAZ, C. CAD scripting and visual programming languages for implementing computational design concepts: A comparison from a pedagogical point of view. **International Journal of Architectural Computing**, v. 10, n. 1, p. 121-138, 2012. ISSN 1478-0771.

CELANI, M. G. C.; PUPO, R. T. Prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção: definições e estado da arte no Brasil. **Cadernos de pós-graduação em arquitetura e urbanismo**, v. 8, n. 1, 2008. ISSN 1809-4120.

CLARK, C. H. **Brainstorming: The dynamic new way to create successful ideas**. Diamonds, 2014.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental**. Editorial Revan, 2003. ISBN 8571062684.

DOS SANTOS, T. O. IDENTIFICAÇÃO DE ILHAS DE CALOR EM RECIFE-PE POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS METEOROLÓGICOS DE SUPERFÍCIE. 2011.

DU, Q.; FABER, V.; GUNZBURGER, M. Centroidal Voronoi tessellations: applications and algorithms. **SIAM review**, v. 41, n. 4, p. 637-676, 1999. ISSN 0036-1445.

EASTMAN, C. M. **BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors**. Hoboken, N.J.: Wiley, 2008. xiv, 490 p., 4 p. of plates ISBN 9780470185285 (cloth) 0470185287. Disponível em: < <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0741/2007029306-t.html> >

EL AHMAR, S.; FIORAVANTI, A. How Plants Regulate Heat: Biomimetic Inspirations for building skins. **48th International Conference of the Architectural Science Association**, 2014.

EPA, U. S. E. P. A. **Heat Island Effect** 2014.

FISHER, A. Engineering Integration: Real-Time Approaches to Performative Computational Design. **Architectural Design**, v. 82, n. 2, p. 112-117, 2012. ISSN 1554-2769. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1002/ad.1387> >.

FLUSSER, V.; CARDOSO, R. **O mundo codificado: por uma filosofia do design e da comunicação**. Editora Cosac Naify, 2007. ISBN 8575035932.

GAGO, E. J. et al. The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, n. 0, p. 749-758, 9// 2013. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113003602> >.

GARTLAND, L. **Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas**. Earthscan LLC, 2012. ISBN 9781849771559. Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?id=wokqNDknBLIC> >.

GAUTHIER, R. et al. Interfaces in polyolefin/cellulosic fiber composites: Chemical coupling, morphology, correlation with adhesion and aging in moisture. **Polymer Composites**, v. 19, n. 3, p. 287-300, 1998. ISSN 1548-0569. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1002/pc.10102> >.

GERSHENFELD, N. How to make almost anything. **Foreign Affairs**, v. 91, n. 6, p. 43-57, 2012.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. **São Paulo**, v. 5, p. 61, 2008.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992. ISSN 0378-7788.

GLEICK, J. **Chaos : making a new science**. New York, N.Y., U.S.A.: Viking, 1987. xi, 352 p., 10 p. of plates ISBN 0670811785.

GROAT, L. N.; WANG, D. **Architectural research methods**. New York: J. Wiley, 2002. xvii, 389 p. ISBN 0471333654 (cloth alk. paper). Disponível em: < Contributor biographical information <http://www.loc.gov/catdir/bios/wiley042/2001026512.html> >

GRUBER, P. **BIOMIMETICS IN ARCHITECTURE-ARCHITECTURE OF LIFE AND BUILDINGS**. Wien: New York: Springer-Verlag 2011.

HAN, J. **DM Fibrapan(MDF). Material for digital fabrication**: IAAC Institute for advanced architecture of Catalonia 2014.

HO, M. **Fibre Configurations for moisture control: a vernacular framework**. Sigradi, XVII Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital: Knowledge-based Design. Valpasaisó 2013.

HOFFMANN, C. M.; JOAN-ARINYO, R. A Brief on Constraint Solving. **Computer-Aided Design and Applications**, v. 2, n. 5, p. 655-663, 2005/01/01 2005. ISSN null. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/16864360.2005.10738330> >. Acesso em: 2014/10/05.

HOLZER, D.; HOUGH, R.; BURRY, M. Parametric Design and Structural Optimisation for Early Design Exploration. **International Journal of Architectural Computing**, v. 5, n. 4, p. 625-643, 12/01/ 2007. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1260/147807707783600780> >.

IBGE. **Cidades: Pernambuco/Recife** 2014.

IWAMOTO, L. **Digital fabrications: architectural and material techniques**. Princeton Architectural Press, 2013. ISBN 1616891785.

IWAMOTO, S. **Voussoir cloud** 2008.

JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. DIVA 2.0: Integrating daylight and thermal simulations using Rhinoceros 3D, Daysim and EnergyPlus. 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011.

JANSSEN, P.; WEE, C. K. Visual dataflow modelling: a comparison of three systems. 2011.

KAZAZIAN, T. Haverá a idade das coisas leves.

KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentals of integrated design for sustainable building**. John Wiley & Sons, 2013. ISBN 1118782720.

KHABAZI, Z. **Generative algorithms (using grasshopper)**. Morphogenesis education, 2012.

KITAYAMA, K. et al. Trichomes and *Atta sexdens* (Hymenoptera: Formicidae): A Study of Foraging Behavior in the Laboratory. **Sociobiology**, v. 55, n. 1, p. 107, 2010. ISSN 0361-6525.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age : design and manufacturing**. New York, NY: Spon Press, 2003. v, 314 p. ISBN 0415278201 (hardcover alk. paper).

LABEEE. **Analysis Bio**. Florianópolis, SC 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. PW Editores, 2004. ISBN 9788586759017. Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?id=WuZkAQAACAAJ> >

LAVAYEN, M.; VIVEROS, L. **Prototype Chair: I** exposición de Jóvenes Arquitectos de Panamá 2013.

LEACH, N. The Limits of Urban Simulation: An Interview with Manuel DeLanda. **Architectural Design**, v. 79, n. 4, p. 50-55, 2009. ISSN 1554-2769.

_____. Parametrics Explained. **Next Generation Building**, v. 1, n. 1, p. 33-42, 2014. ISSN 2213-4425.

LECHNER, N. **Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects**. Wiley, 2014. ISBN 9781118849453. Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?id=II-fBAAAQBAJ> >.

LESSA, C. **O Brasil à luz do apagão**. Editora Palavra & Imagem, 2001. ISBN 9788588099067. Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?id=VTi0AAAAIAAJ> >.

LIMA, R. V. D. S. **Modos projetuais de simulação: uso de ferramentas de simulação térmica no processo projetual de arquitetura**. 2012. Doutorado UFRN, Natal, RN.

MIRZAEI, P. A.; HAGHIGHAT, F. Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations. **Building and Environment**, v. 45, n. 10, p. 2192-2201, 10// 2010. ISSN 0360-1323. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310001083> >.

MONEDERO, J. Parametric design: a review and some experiences. **Automation in Construction**, v. 9, n. 4, p. 369-377, 7// 2000. ISSN 0926-5805. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580599000205> >.

MONTEIRO, K. L. et al. Caracterização morfológica de frutos, de sementes e do desenvolvimento pós-seminal de *Licania tomentosa* (Benth.) Fritsch. **Ciência Rural**, v. 42, n. 1, 2012.

MOTA, C. The rise of personal fabrication. Proceedings of the 8th ACM conference on Creativity and cognition, 2011, ACM. p.279-288.

MOTTA, E.; MOTTA, E. **Reusable components for knowledge modelling : case studies in parametric design problem solving**. Amsterdam ; Washington, DC: IOS Press, 1999. 255 p. ISBN 1586030035 (IOS Press).

NBR, A. NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações, parte 1: Definições, símbolos e unidades **Rio de Janeiro**, 2005a.

_____. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações, parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. **Rio de Janeiro**, 2005b.

NICOL, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 7, p. 628-637, 7// 2004. ISSN 0378-7788. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804000155> >.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982. ISSN 1477-870X. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49710845502> >.

OLGYAY, V. Bioclimatic approach to architecture. BRAB Conference Report, 1953, National Research Council Washington, DC.

OLGYAY, V.; OLGAY, A. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism. Some chapters based on cooperative research with Aladar Olgyay**. Princeton, N.J.,: Princeton University Press, 1963. v, 190 p.

OLIVEIRA, A. S. et al. BENEFÍCIOS DA ARBORIZAÇÃO EM PRAÇAS URBANAS-O CASO DE CUIABÁ/MT. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 9, n. 9, p. 1900-1915, 2013. ISSN 2236-1170.

ONISHI, A. et al. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 9, n. 4, p. 323-332, // 2010. ISSN 1618-8667. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866710000403> >.

OXMAN, N. **Material-based design computation**. 2010. Massachusetts Institute of Technology

PAGE, M. J. Some aspects of architectural bioclimatology. **International journal of bioclimatology and biometeorology**, v. 2, n. 1, p. 304-341, 1958. ISSN 0367-8253.

PALAZZO, L. A. M. Complexidade, caos e auto-organização. **Retrieved October**, v. 4, p. 2006, 2004.

PAPANIKOLAOU, V. J. **Design for the real world; human ecology and social change**. 1st American. New York,: Pantheon Books, 1972. xxviii, 339 p. ISBN 0394470362.

PAWLYN, M. Biomimicry and the Sahara Forest Project. 201_. Disponível em: < <http://saharaforestproject.com/concept/biomimicry.html> >. Acesso em: 01/02/2014.

PAYNE, A.; ISSA, R. The grasshopper primer. **Zen 'Edition. Robert McNeel & Associates**, 2009.

PIVETTA, M. Îlot de chaleur urbain en Amazonie. **Pesquisa FAPESP**, 2012. Disponível em: < <http://revistapesquisa.fapesp.br/fr/2013/08/21/ilot-de-chaleur-urbain-en-amazonie/> >. Acesso em: 25/06/2015.

PROCEL. **Manual de aplicação do RTQ-C**. 3. 2013. Disponível em: < http://www.pbefedificacao.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/manual-rtqc_V4.pdf >.

PUPO, R. T. Ensino da prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção no Brasil: definições e estado da arte. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 1, n. 3, 2008. ISSN 1980-6809.

RATHEE, A.; MITROFANOVA, E.; SANTAYANON, P. Hydroceramic _hydrogel. Digital Matter - Intelligent Constuctions, 2014. Disponível em: < <http://www.intelligentconstructions.com/projects/hydroceramic> >. Acesso em: 10/03/2015.

REPRAP. **Reprap development and further adventures in DIY 3D printing** 2013.

ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS, S. **Ecohouse : a design guide**. Oxford ; Boston: Architectural Press, 2001. iv, 346 p. ISBN 0750649046 (pbk.).

_____. **Ecohouse : a design guide**. 3rd. Oxford ; Burlington, MA: Architectural Press, 2007. vi, 479 p. ISBN 9780750669030 (pbk.). Disponível em: < Table of contents <http://www.loc.gov/catdir/toc/fy0802/2007282712.html> >.

ROBOFOLD. **IAaC Barcelona Workshop** 2012.

ROLLER, D. An approach to computer-aided parametric design. **Computer-Aided Design**, v. 23, n. 5, p. 385-391, 6// 1991. ISSN 0010-4485. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001044859190033S> >.

RORIZ, M. **Arquivos climáticos em formato EPW**. LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações 2012.

ROTZETTER, A. et al. Thermoresponsive polymer induced sweating surfaces as an efficient way to passively cool buildings. **Advanced materials**, v. 24, n. 39, p. 5352-5356, 2012. ISSN 1521-4095.

RYAN, C. O. et al. BIOPHILIC DESIGN PATTERNS: Emerging Nature-Based Parameters for Health and Well-Being in the Built Environment. **International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR**, v. 8, n. 2, p. 62-76, 2014. ISSN 1994-6961.

SALINGAROS, N. A. Life and the Geometry of the Environment. **Athens Dialogues E-Journal, Harvard University's Center for Hellenic Studies**, 2010.

SALINGAROS, N. A.; MASDEN II, K. G. Neuroscience, the natural environment, and building design. **Chapter**, v. 5, p. 59-83, 2008.

SALINGAROS, N. A.; MEHAFFY, M. W. **A theory of architecture**. UMBAU-VERLAG Harald Püschel, 2006. ISBN 3937954074.

SANDONATO, B. B. Método de avaliação e biodegradação do poliacrilato de sódio. 2011.

SANTAMOURIS, M. **Energy and climate in the urban built environment**. London: James & James, 2001. viii, 402 p. ISBN 1873936907.

SANTAMOURIS, M. Heat-island effect. **Energy and climate in the urban built environment**, p. 48-69, 2001.

SANTAMOURIS, M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, n. 0, p. 224-240, 10// 2013. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211300350X> >.

_____. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, v. 103, n. 0, p. 682-703, 5// 2014. ISSN 0038-092X. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12002447> >.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 85, n. 12, p. 3085-3102, 12// 2011. ISSN 0038-092X. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10004020> >.

SCHODEK, D. L. **Digital design and manufacturing : CAD/CAM technologies in architecture**. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2005. xi, 369 p. ISBN 0471456365 (cloth). Disponível em: < Table of contents only <http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip0419/2004014940.html> >

SHI, X.; YANG, W. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation in Construction**, v. 32, n. 0, p. 125-135, 7// 2013. ISSN 0926-5805. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580513000253> >.

SILVA, R. C. D. **Urbanismo paramétrico: parametrizando urbanidade**. UFPE, E. U. D. 2010.

SOUZA, J. L.; CORRÊA, A. C. B. **Impactos da urbanização na geração de risco a alagamentos na planície do Recife**. . 9º Simpósio Nacional de Geomorfologia. Rio de Janeiro 2012.

STEWART, I. D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 200-217, 2011. ISSN 1097-0088. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1002/joc.2141> >.

STRAUBE, J. Moisture and materials. **Building Sci. Digest**, v. 138, p. 137-139, 2006.

SUCH, S. A. **CNC Milling** 2015.

SUTHERLAND, I. E. **Sketch pad a man-machine graphical communication system**. Proceedings of the SHARE design automation workshop: ACM: 6.329-6.346 p. 1963.

SZOKOLAY, S. V. Bioclimatic architecture and solar energy. In: (Ed.). **Human Bioclimatology**: Springer, 1998. p.111-131. ISBN 3642804217.

TALEB, H.; MUSLEH, M. A. Applying urban parametric design optimisation processes to a hot climate: Case study of the UAE. **Sustainable Cities and Society**, v. 14, n. 0, p. 236-253, 2// 2015. ISSN 2210-6707. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670714000997> >.

TEJAS, G. T.; DE AZEVEDO, M. G. F.; LOCATELLI, M. A influência de áreas verdes no comportamento higratérmico e na percepção ambiental do cidadão em duas unidades amostrais no município de Porto Velho, Rondônia, Brasil. **Embrapa Rondônia-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2011.

TIZANI, W.; MAWDESLEY, M. J. Advances and challenges in computing in civil and building engineering. **Advanced Engineering Informatics**, v. 25, n. 4, p. 569-572, 10// 2011. ISSN 1474-0346. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034611000632> >.

TURRIN, M.; VON BUELOW, P.; STOUFFS, R. Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. **Advanced Engineering Informatics**, v. 25, n. 4, p. 656-675, 10// 2011. ISSN 1474-0346. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034611000577> >.

WILLIS, K. D. et al. Interactive fabrication: new interfaces for digital fabrication. Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction, 2011, ACM. p.69-72.

WONG, N. H.; YU, C. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. **Habitat International**, v. 29, n. 3, p. 547-558, 9// 2005. ISSN 0197-3975. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197397504000281> >.

WOODBURY, R. **Elements of parametric design**. London ; New York, NY: Routledge, 2010b. xi, 300 p. ISBN 0415779863 (hardback)

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. Oxford ; New York: Oxford University Press, 1987. xv, 383 p. ISBN 019282080X (pbk.). Disponível em: < Publisher description <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0603/87007853-d.html> >.

YANG, J.; WANG, Z.-H.; KALOUSH, K. E. Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, n. 0, p. 830-843, 7// 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115002452> >.

YEANG, K. **Designing with nature: the ecological basis for architectural design**. McGraw-Hill New York, NY, 1995. ISBN 0070723176.

_____. **Ecodesign : a manual for ecological design**. London, UK: Wiley-Academy, 2006. 499 p. ISBN 9780470852910 (hbk.) 9832726409. Disponível em: < Publisher description <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0714/2007386411-d.html> >

ZHU, X.-G.; LONG, S. P.; ORT, D. R. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? **Current Opinion in Biotechnology**, v. 19, n. 2, p. 153-159, 4// 2008. ISSN 0958-1669. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958166908000165> >.

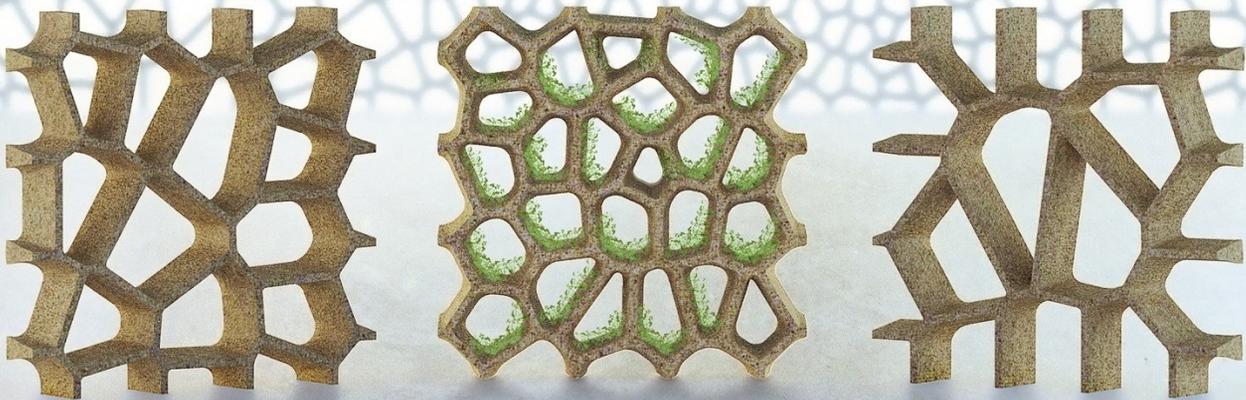
ZINZI, M.; AGNOLI, S. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. **Energy and Buildings**, v. 55, n. 0, p. 66-76, 12// 2012. ISSN 0378-7788. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811004129> >.

9 Apêndice

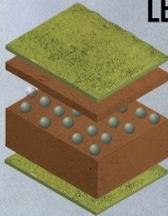
9.1 Infográficos.

Estes infográficos foram enviados ao *Holcim Awards* em março de 2014. A proposta foi realizada anterior às fases de prototipagem e avaliação, sendo que, levou em consideração o embasamento teórico e o estudo de caso desta dissertação. Esta proposta obteve certificado de mérito e foi uma das submissões que foram selecionadas para avaliação aprofundada pelo jurados. O concurso obteve cerca de 6.000 inscrições em todo mundo.

LEAF BRICK MODULES

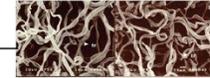
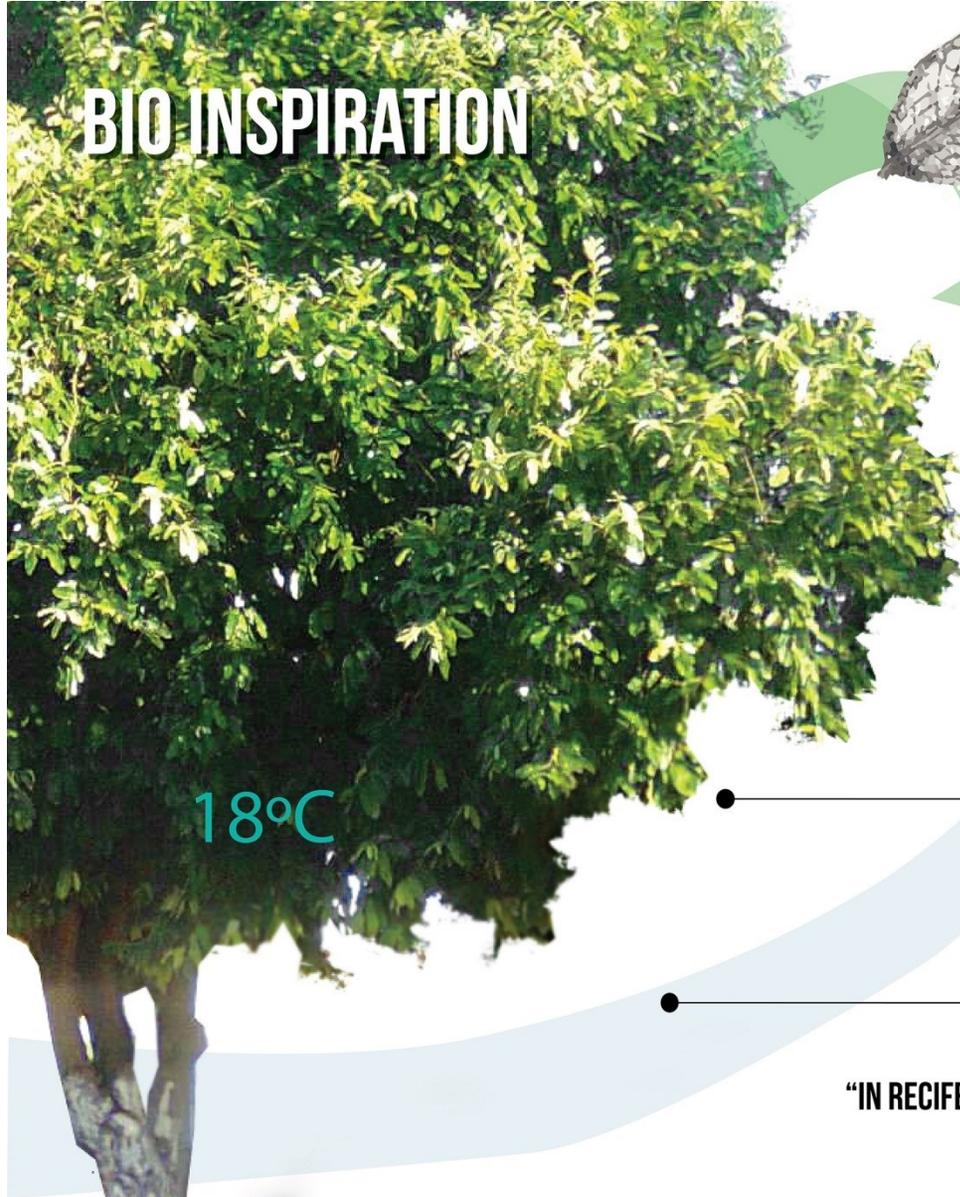


LEAF BRICK LAYERS

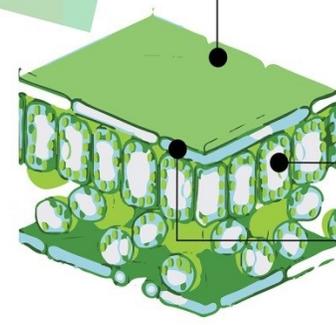


- MOSS / BINDWEED - PHOTOSYNTHESIZING LAYER
- HIGH DENSITY COCONUT FIBER - STRUCTURAL LAYER
- HYDROGEL - EFFICIENTLY ATTRACTS AND ABSORBS WATER COLLABORATING WITH PLANT NUTRITION AND EFFECTS SIMILAR TO EVAPOTRANSPIRATION
- LOW DENSITY COCONUT FIBER - PLANT SUBSTRATE AND NATURAL WATER ABSORPTION PROPERTIES

BIO INSPIRATION



Trichome are appendages that occur on the epidermis of plants. Some trees native to the northeastern region of Brazil have trichome that manifest themselves in the form of fibers. On a leaf, it performs several functions. Among them, two are of particular interest: moisture and temperature regulation, and water absorption. These functions lead to geometric and material design considerations.



Photosynthesis is the process through which plants convert light energy into chemical energy so that they can perform their typical functions. As a byproduct of the process, the plant releases O₂ into the atmosphere. A less known effect of photosynthesis is the reduction of radiation due to the conversion of light energy into

Evapotranspiration is a measure of water loss over time. It considers loss of water through transpiration of plants and through water evaporation on the soil. This process affects the water loss on drainage basins and superficial temperature in plants, as well as overall superficial temperature.

Shading refers to the obstruction of direct solar radiation. It affects superficial temperature, thermal sensation.

Ventilation is a strategy to allow the flow of wind through the built environment. It promotes heat exchange, collaborates with evapotranspiration and reduces

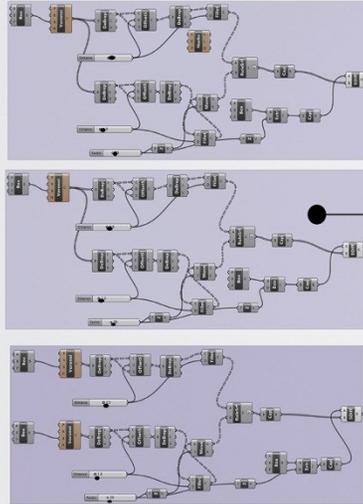
Albedo is a relative measure of environmental reflected light. Light reflection by different surfaces is directly associated with solar radiation reflection. Increasing the albedo implies in reduced superficial temperatures and, therefore, reduction of the heat island effect. Due to its influence on solar radiation, trees increase albedo on urban landscapes.

18°C

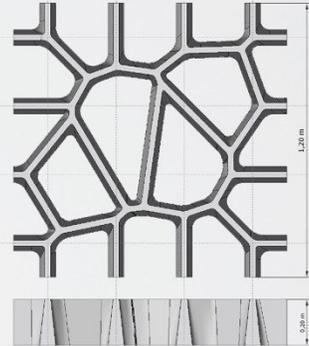
“IN RECIFE, WE NEED TO DESIGN LIKE A TREE”

LEAF BRICK - PARAMETERIZATION

PARAMETERIZATION DIAGRAM - MODULES



MODULE - 01

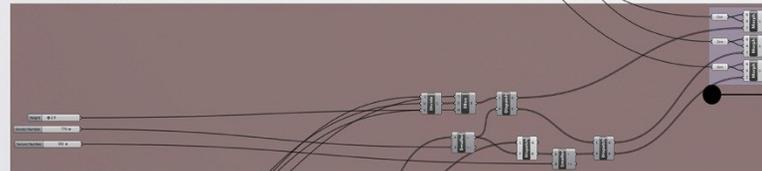


MODULE - 02

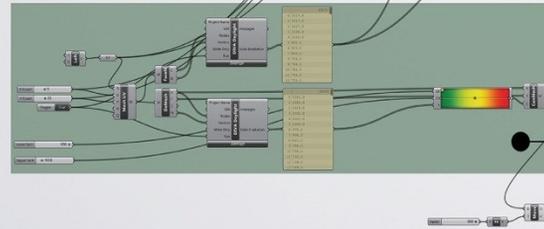


MODULE - 03

PARAMETERIZATION DIAGRAM - POSITIONING



PARAMETERIZATION DIAGRAM - RADIATION SIMULATION



Positioning of types of Leaf Brick on a system responds to an automated simulation process within the model. Thus if the systems design is altered or applied in different urban situations the positioning and type of the Leaf Brick respond to specific demands of the design context.



PARAMETRIC POSITIONING



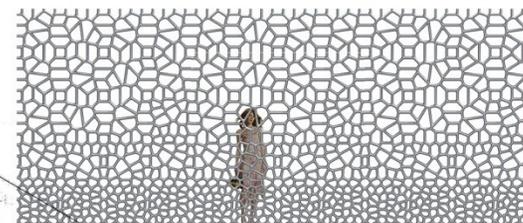
INCIDENT RADIATION SIMULATION FOR RECIFE-BRAZIL

LEAF BRICK

APPLICATION STUDY 01 - BUS STATION IN CAXANGA AVENUE



CURRENT SCENARIO
The glazed facade creates a greenhouse effect inside the bus station and its increases energy consumption.

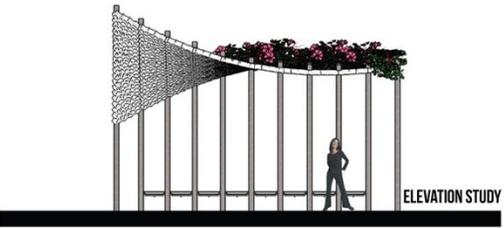


ELEVATION STUDY

LEAF BRICK APPLICATION STUDY 02 - CAPIBARIBE RIVER



CURRENT SCENARIO
Considered as a touristic interest area, the riverside does not offer contemplation spaces or adequately shaded areas.



LEAF BRICK APPLICATION STUDY 03 - RECIFE'S HISTORIC DISTRICT

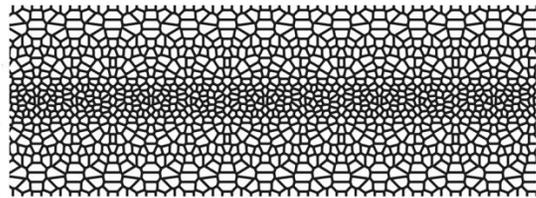


LEAF BRICK - APPLICATION STUDY 03



CURRENT SCENARIO

Also an touristic interest area, the historic district narrow streets could offer visitors pedestrian walkways with shaded portions using Leaf Brick system.



TOP VIEW STUDY