

SISTEMAS GENERATIVOS DE PROJETO: CLASSIFICAÇÃO E REFLEXÃO SOB O PONTO DE VISTA DA REPRESENTAÇÃO E DOS MEIOS DE PRODUÇÃO

*Gabriela Celani¹
Carlos Vaz²
Regiane Pupo³*

Resumo: O objetivo deste trabalho é apresentar os sistemas generativos de projeto, com a finalidade de estabelecer relações com os novos meios de produção pós-industrial do edifício. Esses sistemas constituem-se em um método indireto de projeto, em que não há preocupação apenas com uma situação específica, mas com a definição de uma lógica que permite solucionar o problema em diferentes contextos. São apresentados vários exemplos de mecanismos capazes de gerar composições visuais, agrupados segundo as categorias propostas por Knight (2011): sistemas baseados na lógica e sistemas com inspiração na biologia. Na parte final do artigo é feita uma correlação entre os sistemas generativos e as técnicas de fabricação digital, e uma descrição das técnicas de modelagem necessárias para essa nova dinâmica do processo de projeto, que exige o uso de novos modos de representação.

Palavras-chave: sistema generativo; métodos de produção; prototipagem; projeto auxiliado por computador; método de projeto.

Abstract: This paper presents generative design systems, with the aim of establishing relationships between these systems and the new post-industrial building production methods. Generative systems are indirect design methods, in which the designer does not focus on just one specific situation, but rather on defining a logic that allows solving a problem in different contexts. Many examples of systems that can generate visual compositions are presented, grouped according to Knight's categories: systems based on logic and inspired by biology. In the final part of the paper a correlation between generative systems and digital fabrication techniques is established, followed by a description of the modeling techniques that are needed for this new design dynamics, which requires the use of new types of representation.

Keywords: generative system; production methods; prototyping; computer-aided design; design method.

¹ Departamento de Arquitetura e Construção, UNICAMP, celani@fec.unicamp.br.

² Departamento de Expressão Gráfica, UFPE, carlosvaz00@yahoo.com.br.

³ Departamento de Expressão Gráfica, UFSC, regipupo@terra.com.br.

1 Introdução

Nos últimos anos, os arquitetos tornaram-se muito interessados nos processos generativos de projeto e nas novas técnicas de fabricação. Mas o que essas duas novidades têm em comum? Segundo Carpo (2005) “as funções contínuas geradas por algoritmos podem ser utilizadas para produzir elementos individuais, além de criar séries inteiras ou famílias de elementos”. Nestas séries, todos os seus elementos, mesmo que diferenciados, compartilham de uma mesma matriz algorítmica. Carpo (2005) define como “produção não standard” a produção em série de peças não idênticas. Uma série não standard não se define pelo elemento individual que a compõe, mas pelas mudanças realizadas nas leis que modificam a série. Com isso, o que conta em uma série não standard é o diferencial entre seus elementos e não os atributos específicos de cada um deles.

Já nos anos 1970 Mitchell (1975) apresentava este conceito como algo que não era novo, e que podia ser encontrado desde a Antiguidade Clássica. Aristóteles, por exemplo, propôs sistemas de combinação de partes de animais e de cidades. Ramon Llull (1885), um filósofo espanhol do século XIII, desenvolveu um sistema baseado em rodas concêntricas que conteriam todo o saber da época. Mitchell (op.cit.) cita ainda um trecho da obra *As viagens de Gulliver*, publicada no século XVIII por Jonathan Swift, em que o autor descreve um sistema generativo capaz de combinar aleatoriamente todas as palavras existentes no dicionário, gerando todos os livros já escritos e aqueles que ainda seriam escritos, além de uma enorme quantidade de textos sem significado algum.

Na Arquitetura dois grandes exemplos históricos de sistemas generativos são os tratados de Palladio (1570) e de Durand (1809). No primeiro caso, o sistema proposto consiste em uma série de regras de proporção e de distribuição dos espaços em um edifício. Durand, por outro lado, definiu os elementos de Arquitetura, e em seguida as possíveis formas de combiná-los entre si. No século XX, os primeiros estudos relacionados ao processo generativo de projeto apareceram no início dos anos 1950 e 1960, junto com a informática, a inteligência artificial e a pesquisa operacional, e foram desenvolvidos como estratégias para a resolução de problemas. (ver figura 1)

Este artigo pretende dar uma visão geral sobre os sistemas generativos de projeto, com base em uma revisão da literatura sobre o tema nas últimas cinco décadas. O objetivo é estabelecer uma base para uma discussão sobre a relação entre estes sistemas e os novos paradigmas de fabricação pós-industrial e de técnicas de

construção automatizada. Com este propósito, este artigo tenta responder às seguintes questões:

- O que são projetos generativos e sistemas generativos de projeto?
- Quando um projetista deve utilizar como abordagem os processos generativos de projeto, em vez de métodos tradicionais?
- Quais são os tipos de sistemas generativos de projeto e suas principais características?
- Qual é a relação entre os sistemas generativos de projeto e as técnicas de produção pós-industrial?

O método utilizado para explicar o conceito de sistemas generativos será baseado na descrição de uma série de exemplos, seguido de algumas propostas de categorizações possíveis segundo suas características.

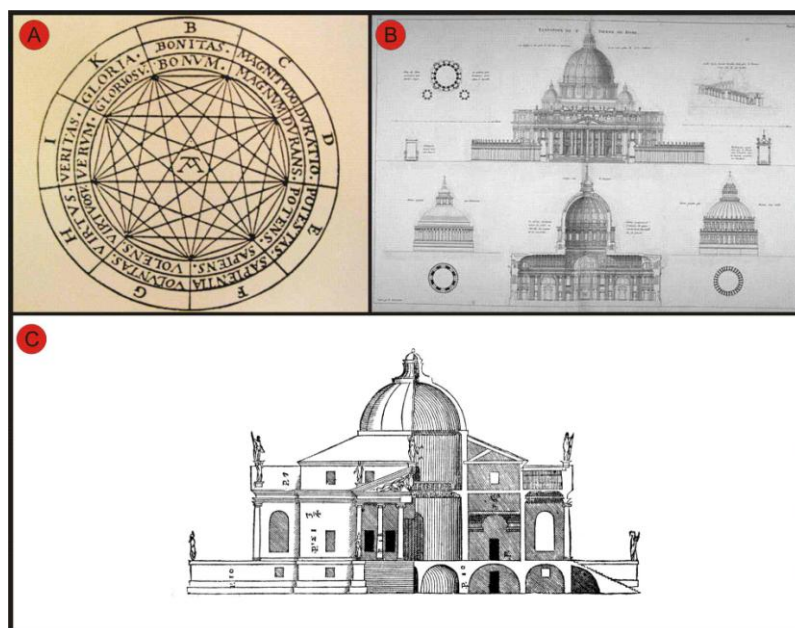


Figura 1 - (a) Roda generativa de Ramon Llull. Fonte: Llull (1985); (b) Exemplo de página do livro *Précis des leçons d'architecture données à l'École royale polytechnique*. Fonte: Durand (1809); (c) Elevação da Vila Rotonda. Fonte: Palladio (2002).

2 Definições

Um sistema generativo é um método indireto do projeto, no qual o projetista não se preocupa com a solução de um problema em particular em um contexto específico, mas sim com a definição de um método que possibilite resolver problemas semelhantes em diferentes contextos e com características ligeiramente distintas. De

acordo com Mitchell (1975, p. 128) um sistema generativo pode “ser operado para produzir uma variedade de soluções potenciais”.

Fischer e Herr (2001) publicaram um diagrama que explica a abordagem do sistema generativo de projeto visualmente, não deixando dúvidas sobre o papel desses sistemas no processo de projeto (ver figura 2a).

Dado que o objetivo de um sistema generativo é dar origem a um grande número de soluções possíveis, em vez de uma única opção, este pode ser utilizado em três situações distintas:

- Otimização de soluções de problemas: em certos problemas de projeto os critérios são bem definidos, mas não existe nenhum método direto para encontrar uma solução, por isso é necessário gerar e testar todas as possibilidades, de modo a encontrar a melhor alternativa.
- Geração de famílias de objetos: em certas situações busca-se um grande número de soluções similares, contudo apresentando algumas diferenças. Este tipo de problema é muito comum em design industrial, e pode ocorrer também na Arquitetura, por exemplo, na concepção de peças pré-fabricadas para a construção.
- Exploração: quando há um problema de projeto cujos critérios de solução estão mal definidos é importante buscar diferentes possibilidades de modo a avaliar os seus prós e contras, a fim de encontrar uma solução satisfatória, ou o melhor equilíbrio possível.

Enquanto a primeira abordagem visa atender, da melhor maneira possível, a parâmetros pré-determinados, a segunda e a terceira aplicações se relacionam mais à busca por soluções mais criativas e originais para um problema, por meio da variedade de alternativas.

Antes de proceder à descrição de exemplos de sistemas generativos de projeto, é importante introduzir também os conceitos de espaço de busca e de procedimentos de avaliação de soluções. A resolução de problemas é um campo bem definido de investigação que envolve conhecimentos de psicologia, de inteligência artificial e de ciências cognitivas. Esta área lida com dois tipos principais de problemas, segundo os critérios exigidos para que uma solução seja adequada: os bem-definidos e mal-definidos. Normalmente, um problema bem-definido tem apenas uma solução possível ou um pequeno grupo de soluções possíveis, enquanto para o mal-definido pode haver inúmeras alternativas possíveis. Na Arquitetura a maioria dos problemas são

mal-definidos, contudo o processo de projeto permite sua compartimentação em subproblemas menores e bem-definidos. Há uma extensa e interessante bibliografia sobre o tema, que inclui obras como as de Simon (1967) e de Eastman (1969).

Um espaço de soluções é formado por um conjunto de soluções possíveis para um dado problema mal-definido. Fazem parte do espaço de solução respostas que podem ou não ser satisfatórias para um uma dada situação. Dentro do conjunto de soluções satisfatórias (S), há um subconjunto formado por soluções particularmente boas (B), como mostrado na figura 2b.

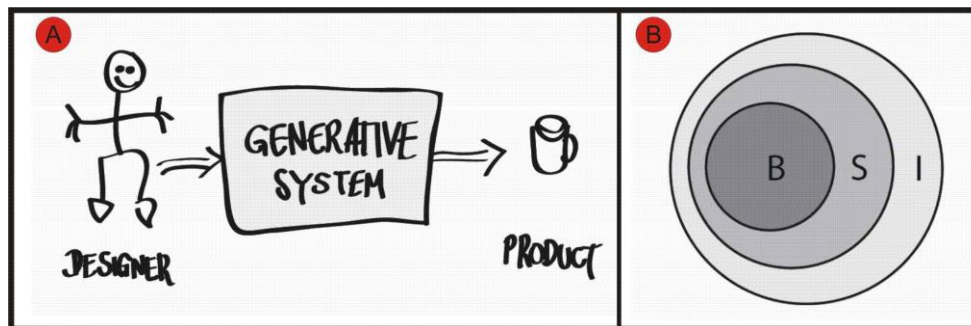


Figura 2 - (a) Diagrama sobre o processo generativo de projeto. Fonte: Fischer e Herr (2001). (b) Uma das possíveis relações entre soluções boas (B), satisfatórias (S) e insatisfatórias (I) em um espaço de soluções. Fonte: Mitchell (1975).

Alguns sistemas generativos podem gerar todas as soluções possíveis para um determinado problema mal-definido. Este método é chamado de geração exaustiva ou às cegas. Quando isso ocorre, surge outra questão, relacionada à escolha de uma solução entre tantas possibilidades criadas. Contudo, um sistema generativo de projeto pode conter um procedimento de avaliação, que é muito útil no caso de sistemas que geram um número muito grande de respostas possíveis. Um procedimento de avaliação só pode ser definido se houver pelo menos alguns critérios objetivos para distinguir as soluções satisfatórias das insatisfatórias.

As regras de proporção estabelecidas nos tratados de Arquitetura, como nos Quatro Livros de Arquitetura de Palladio, podem ser consideradas bons exemplos de critérios estéticos objetivos. Para este arquiteto, uma sala seria considerada adequada se suas proporções seguissem seus métodos matemáticos para calcular sua profundidade com base na sua largura, e sua altura segundo sua profundidade e largura. Atualmente, as regras de proporção não são mais usualmente utilizadas, e muitas vezes é difícil para os projetistas tornar seus critérios de avaliação explícitos, especialmente aqueles relacionados à estética.

No entanto, mesmo quando os critérios de avaliação são objetivos, testar todas as soluções possíveis, em alguns casos, pode consumir muito tempo. Outra abordagem para este problema é gerar apenas as respostas que são susceptíveis de serem pelo menos satisfatórias, com base, por exemplo, na experiência anterior ou em regras gerais. Esta estratégia é conhecida como heurística e está presente nos métodos tradicionais de projeto que são baseados em processos de decisão. A geração heurística produz um número menor de soluções do que a geração exaustiva. Contudo, com a utilização deste método muitas possibilidades criativas podem não ser sequer levadas em consideração.

Quando o número de soluções possíveis é muito grande para ser administrado, mas a inovação é importante, pode ser utilizada como estratégia alternativa a geração aleatória. Em vez de enumerar todas as possibilidades, gera-se ao acaso um número menor de alternativas e, em seguida, elas são testadas. Este conceito está presente na evolução natural, onde os indivíduos de uma dada espécie cruzam entre si aleatoriamente para produzir novas combinações de características que são passadas aos seus descendentes por meio dos genes dos pais. Neste caso, a seleção natural pode ser considerada como sendo o procedimento de avaliação das soluções. Os candidatos ruins serão naturalmente eliminados pelo meio ambiente.

3 Exemplos de sistemas generativos de projeto

No método tradicional de projeto as soluções são geradas pelo arquiteto, com base em experiências anteriores e em precedentes. Os arquitetos elaboram desenhos, como plantas e seções, e constroem maquetes para representar suas soluções e avaliá-las visualmente. Neste método, porém, o número de possibilidades é limitado, pois não se explora todo o espaço de soluções. Com o uso de sistemas generativos é possível gerar sistematicamente um maior número de alternativas. São apresentados a seguir alguns exemplos desses sistemas, agrupados nas duas categorias propostas por Knight (2011): sistemas baseados na lógica e sistemas inspirados na biologia.

3.1 Sistemas baseados na lógica

Knight (2011) cita como principais sistemas baseados na lógica as gramáticas de diversos tipos: os sistemas de produção de Post, a gramática gerativa de Chomsky, as pattern grammars de Fu e as shape grammars de Stiny. São acrescentados aqui outros sistemas generativos baseados em operações lógicas, como os que utilizam operações de simetria, combinatória, parametrização, e teoria dos grafos.

Simetria

Um método generativo que tem sido utilizado por arquitetos há séculos é a simetria. Operações simétricas podem ser aplicadas a uma dada forma, resultando em diferentes soluções projetuais. Exemplos de padrões e projetos arquitetônicos gerados pela aplicação de diferentes operações simétricas foram discutidos por March e Steadman (1971). Alguns deles são apresentados na Figura 3a.

Combinatória

Alguns sistemas generativos de projeto permitem produzir todas as combinações diferentes possíveis de um número de elementos, por meio de um processo exaustivo de permutação. É relativamente simples, por exemplo, escrever um script para um aplicativo de CAD (Computer aided design) que gera todas as combinações possíveis entre de três paralelepípedos, como no exemplo apresentado na figura 3c (CELANI, 2003). Este script é capaz de gerar 29 soluções, portanto 512 possibilidades diferentes. Entretanto, algumas delas podem não ser aceitáveis. Para evitar a geração de soluções indesejadas, uma simples declaração condicional pode ser introduzida no programa, tornando-o mais eficaz.

Projeto paramétrico

Descrições paramétricas dos projetos também podem ser utilizadas para gerar múltiplas alternativas por meio da substituição sistemática de valores (MONEDERO, 1997). Para evitar a geração de soluções inaceitáveis, pode-se estabelecer um intervalo de valores desejáveis ou limitações específicas. Alguns aplicativos de CAD, tais como o Bentley Generative Components e o Grasshopper, permitem criar barras de rolagem que controlam os valores dos parâmetros em um desenho, permitindo ao projetista visualizar muitas soluções possíveis em tempo real, sem a necessidade de gerar todas.

Grafos

Os grafos começaram a ser utilizados na década de 1960, para resolver problemas de adjacência, uma questão que envolve as áreas da Pesquisa Operacional e Gestão de Recursos, por autores como Whitehead e Eldars (1964), Levin (1964), Casalaina e Rittel (1967) e Krejcirik (1969). Os grafos são representações esquemáticas de relações topológicas entre elementos. Eles podem ser utilizados, por exemplo, para representar os diferentes espaços em uma planta arquitetônica. A teoria dos grafos

pode ser usada para gerar todas as combinações que respondem a uma exigência de adjacência, para que se possa escolher a solução mais eficiente do ponto de vista funcional. Este tipo de estudo foi comum na década de 1970, quando foram publicados trabalhos por autores como Steadman (1973), March e Earl (1977), March e Steadman (1971), Mitchell, Steadman e Liggett (1976). Estes se tornaram referências importantes nas áreas de teoria do projeto assistido por computador e de metodologia do projeto. No entanto, como esclarece Steadman (1973), o número de representações possíveis aumenta rapidamente se o número de pontos em um grafo é superior a seis, o que torna inviável avaliar todas as soluções. Além disso, para cada grafo gerado há diferentes arranjos de planta possíveis, pois ele nada mais é que uma representação esquemática das relações entre os espaços (BLOCH & KRISHNAMURTI, 1978).

Gramáticas da forma

As gramáticas da forma desenvolvidas por George Stiny e James Gips na década de 1970 (STINY & GIPS, 1972), são outro exemplo de sistema generativo de projeto baseado em regras. As gramáticas da forma geralmente compreendem um grande número de regras que são aplicadas à vontade pelo projetista, e não apenas de maneira recursiva e sistemática, como ocorre nos fractais (ver fractais em sistemas generativos inspirados pela biologia). Outra diferença entre as gramáticas e os fractais é o fato de que com as primeiras é possível lidar com a emergência, ou seja, podem-se aplicar regras sobre uma forma que não foi explicitamente inserida na composição, mas que resultou da sobreposição de outras formas (Figura 3). Esta característica das gramáticas da forma torna trabalhosa sua implementação em computadores, pois este não é capaz de lidar com informações em nível visual, como o cérebro humano, mas apenas em nível simbólico. Knight (1999) fornece uma boa introdução sobre gramática da forma e a emergência de formas.

3.2 Sistemas inspirados na biologia

Os sistemas inspirados na biologia apresentados por Knight (2011) são os algoritmos evolutivos, os autômatos celulares e os sistemas auto-organizados. Além destes, foram adicionados aqui os os fractais, também inspirados por determinadas formas da natureza.

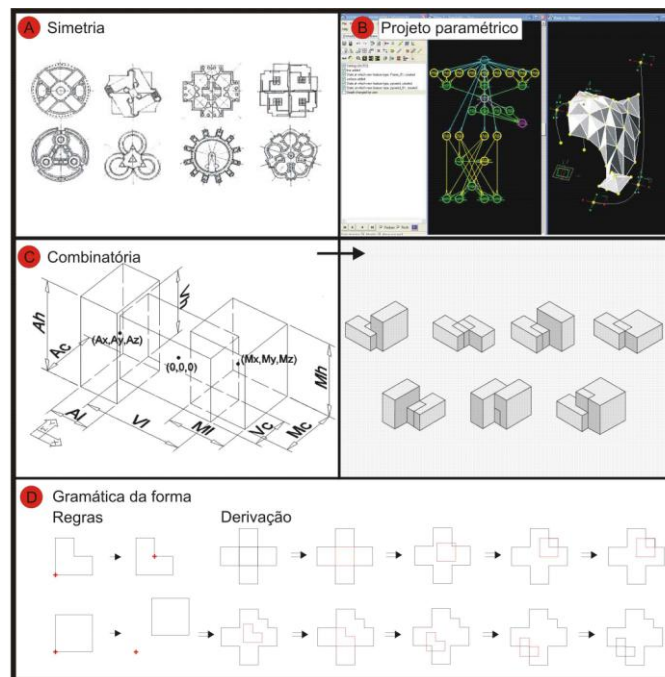


Figura 3 - (a) Edifícios gerados por diferentes operações de simetria. Fonte: March e Steadman (1971); (b) Ambiente do software paramétrico Generative Components da Bentley; (c) Diagrama explicando a geração de uma composição com três paralelepípedos, e composições nas quais o paralelepípedo do meio fica escondido dentro dos outros. Fonte: Celani (2003); (d) Processo de derivação de uma gramática com apenas duas regras. Fonte: Knight (1999).

Fractais

Os fractais são um exemplo de sistema generativo inspirado em formas naturais, tais como as encontradas nos flocos de neve, nas folhas de samambaias e nas flores de brócolis. Eles se baseiam na aplicação recursiva de regras icônicas. Um fractal é composto por uma regra de substituição (gerador) que é aplicada recursivamente em uma forma inicial (base). As principais características dos fractais são auto-similaridade e um alto nível de complexidade. A variação nas soluções geradas pelos fractais depende de onde e de quantas vezes a regra é aplicada. A geometria fractal remonta ao século XVII, mas o termo foi cunhado em 1975 por Benoît Mandelbrot (1982). Yessios (1987) descreveu a aplicação da geometria fractal para a geração de projetos em uma disciplina de projeto ministrada por ele e por Peter Eisenman, na Universidade da Carolina do Sul (Figura 4a).

Autômatos celulares

Os autômatos celulares (AC) são um exemplo de técnica de implementação utilizada originalmente em uma área conhecida como vida artificial (artificial life), que tem como

objetivo simular fenômenos biológicos por meio de técnicas computacionais. Ela pode ser utilizada como sistema generativo de projeto, em especial para a geração de padrões gráficos. A técnica de modelagem de um AC começa com a definição de um grid ou espaço quadriculado (CONWAY, 1970). Cada célula do grid pode assumir dois ou mais estados diferentes. Um conjunto de regras determina como o estado de uma célula deve ser alterado, em função das condições ao seu redor. O sistema é iniciado a partir de uma situação inicial definida pelo usuário do programa. A partir daí, as regras são aplicadas a todas as unidades do grid simultaneamente e de maneira recursiva. A aplicação das regras pode resultar em diferentes padrões, após um determinado número de iterações (ver Figuras 4b e 4c).

Diversos trabalhos mostram o uso da técnica de autômatos celulares na geração de composições visuais. Terzidis (2006), por exemplo, descreve um código de autômato celular capaz de gerar padrões variados em um grid formado por quadrados coloridos. Segundo esse autor, padrões assim gerados podem representar o crescimento de cidades ou outros fenômenos baseados em regras.

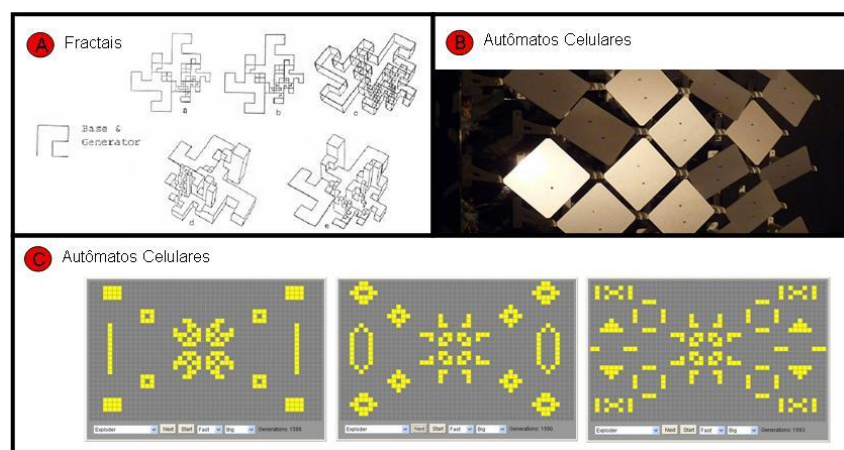


Figura 4 - (a) Exemplo de aplicação de um fractal em sala de aula. Fonte: Yessios (1987); (b) Exemplo de elementos de fachada elaborado por meio da aplicação de um autômato celular. Fonte: Shavara (2010). (c) Implementação de jogo da vida baseado em autômatos celulares. Fonte: Martin (2010).

Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos (GA), um exemplo de computação evolutiva, são sistemas generativos de projeto inspirados nas ciências naturais. Segundo a teoria da evolução de Darwin, cada geração de uma determinada espécie representa um refinamento em termos de adaptação ao ambiente. Essa adaptação acontece por meio da recombinação aleatória das características dos indivíduos e de sua exposição às

condições naturais. Como resultado desse processo os indivíduos mais fracos perecem, enquanto os mais bem adaptados ao meio sobrevivem.

Na natureza, a recombinação de características dos indivíduos ocorre no nível genético. Um genótipo é uma representação simbólica do fenótipo de um indivíduo, ou seja, de suas características físicas. O número de genes na maioria das espécies é muito grande e, portanto, o número de possíveis combinações de suas características é enorme. Uma vez que seria impossível enumerar todas as combinações de genes para uma determinada espécie, uma boa alternativa é gerar aleatoriamente apenas algumas delas e, em seguida, testá-las. A geração de diferentes combinações é alcançada na natureza por meio da reprodução sexual, quando os genes da mãe são combinados com os do pai. O crossing-over e a mutação são mecanismos que aumentam ainda mais a possibilidade de recombinação, permitindo a emergência de novas características inesperadas. Quando os filhos - com novas combinações genéticas - nascem, eles são testados pela exposição ao ambiente, onde apenas bons "projetos" vão sobreviver e passar suas características à geração seguinte (ver Figura 5).

Desde o início do desenvolvimento da Ciência da Computação, o conceito de evolução natural foi considerado um paradigma muito interessante para ser aplicado à resolução de problemas mal-definidos, por duas razões. Em primeiro lugar, ela envolve operações em um nível simbólico, que pode ser facilmente tratado pelo computador. Em segundo lugar, é uma maneira eficaz de lidar com os problemas nos quais o espaço de busca é muito grande, uma vez que apenas parte das possíveis soluções é gerada. Mesmo com os computadores mais poderosos, existem inúmeros problemas combinatórios que demandariam anos para serem computados se todas as possibilidades tivessem de ser enumeradas.

No início dos anos 1970, foram realizadas as primeiras aplicações da computação evolutiva no processo de projeto. Bentley (1999) e Holland (1992) fornecem bons fundamentos teóricos para a área, enquanto as aplicações práticas podem ser encontradas, por exemplo, em Frazer (1995), Gero e Schnier (1995), Poon e Maher (1997), e Garza e Maher (1999).

Há muitos outros exemplos de sistemas generativos de projeto, alguns dos quais são na verdade combinações dos exemplos acima, como as gramáticas da forma paramétricas. É possível dizer, no entanto, que os sistemas aqui apresentados ilustram as características mais importantes dos sistemas generativos usualmente utilizados em projeto.

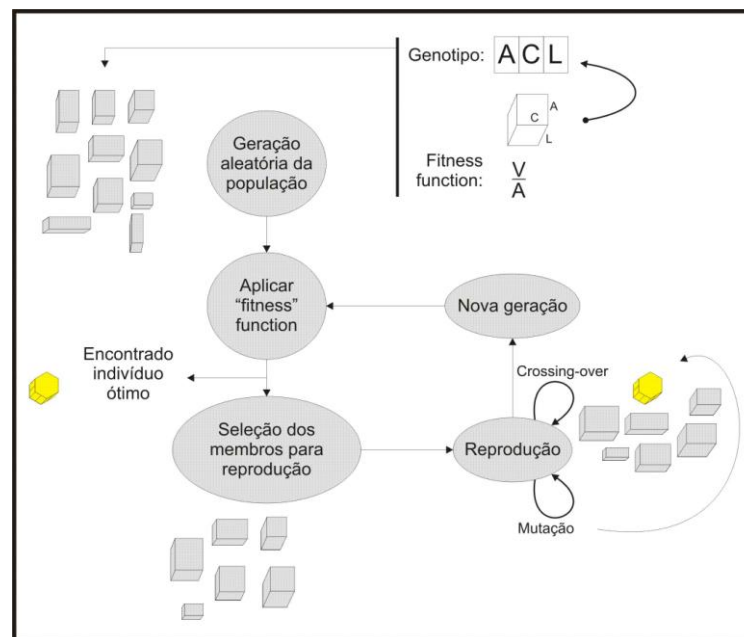


Figura 5 - Diagrama mostrando as principais etapas de geração por meio de um algoritmo genético (esquema criado a partir de Holland, 1992).

4 Caracterização dos sistemas generativos

Os sistemas generativos de projeto podem ser agrupados de diferentes maneiras, dependendo dos critérios adotados. Como vimos acima, Knight (2011) os agrupa segundo a fonte de inspiração (lógica ou biologia). Mitchell (1975), por outro lado, afirma que existem três tipos de sistemas generativos, segundo o método de representação utilizada: icônica (visual, como nas plantas e cortes), simbólica (como nos modelos matemáticos) e analógica (que representa o comportamento do sistema). Além desses critérios, outros ainda podem ser adotados. A Tabela 1 mostra outras possibilidades de categorização, de acordo com:

- Possibilidade de automação;
- Nível de controle que o usuário tem sobre o projeto;
- Determinística;
- Possibilidade de identificação de formas emergentes;
- Espaço de busca
- Objetividade dos procedimentos de avaliação geralmente utilizados.

As características dos sistemas fazem com que eles sejam mais ou menos utilizados para determinadas aplicações. Por exemplo, algoritmos genéticos são normalmente associados a procedimentos de avaliação objetiva. Geralmente, um

algoritmo genético inclui uma função de “fitness”, que automaticamente testa cada indivíduo segundo uma condição objetiva. No entanto, também é possível usar um algoritmo genético simplesmente para gerar um número de indivíduos, que podem então ser testados subjetivamente, segundo critérios estéticos definidos pelo projetista.

Tabela 1 - Categorização dos sistemas generativos segundo 8 características diferentes (proposta pelos autores)

Sistemas generativos	Simetria	Combinatorial	Paramétrica	Grafos	Gramática da forma	Fractais	Autômatos celulares	Algoritmos genéticos
Método de modelagem (Mitchell, 1975): <u>A</u> nalógico <u>I</u> cônico <u>S</u> imbólico	I	I/S	S	S	I	I	S	S
Inspiração (Knight, 2009) <u>T</u> radicional <u>L</u> ógica <u>B</u> iologia	M	M	M	M	T/M	C	B	C
Automação: por <u>C</u> omputador <u>M</u> anual	M/C	M/C	C	C	M	M/C	C	C
Controle pelo projetista: <u>A</u> lta <u>M</u> édia <u>B</u> aixa	M	M	M	B	A	M	B	B
Previsibilidade: <u>D</u> eterminística <u>N</u> ão-determinística	D	D	D	N	D/N	D	N	D/N
Permite emergência: <u>S</u> im <u>N</u> ão	S	N	N	N	S	N	N	S
Espaço de busca: <u>H</u> eurística <u>A</u> leatória <u>E</u> xaustiva	E	E	E	E	H	E	A	A
Procedimento de <u>A</u> valiação: <u>S</u> ubjetivo <u>O</u> bjetivo	S	S/O	O	O	S	S	S	O

5 Os sistemas generativos e os novos meios de produção

Não há dúvidas que a era digital revolucionou e reconfigurou a relação entre concepção e produção de projeto. Um elo entre o que pode ser concebido e o que pode ser construído se formou. Os processos de trabalho na construção civil têm mudado substancialmente desde a introdução dos primeiros sistemas CAM (Computer-Aided Manufacturing). Com a utilização dos processos de fabricação digital, a diferenciação entre a maquete e o elemento construtivo é cada vez menor,

em consequência do uso da mesma informação para a construção do modelo e da peça final.

Os métodos de produção que se baseiam em modelos geométricos digitais são chamados genericamente de sistemas de fabricação digital (Digital Fabrication) e incluem diversos tipos de equipamentos CNC (Computer Numeric Control). Esses equipamentos fazem a transferência de dados de um programa de modelagem 3D para a fabricação direta com técnicas subtrativas, aditivas ou de conformação. Suas aplicações na Arquitetura e construção, por exemplo, são as mais variadas e vão desde a produção de fôrmas para concreto armado com formas livres até a produção de ornamentos esculpidos em pedra que podem ser utilizados como “próteses” arquitetônicas em obras de restauro. Segundo Kolarevic (2005, apud OOSTERHUIS, 2005), uma das características mais importantes da fabricação digital é que ela possibilita resultados variáveis e não repetitivos, induzindo ao conceito de mass-customization (personalização em massa) e permitindo o desenvolvimento de sistemas construtivos não padronizados por meio de diferenciações seriadas e variações digitalmente controladas.

A diferença entre os métodos de produção em massa e os novos métodos de produção personalizada é o fato de que o objetivo do primeiro era produzir milhares - ou mesmo milhões - de cópias do mesmo objeto. Estes eram baseados em moldes, de execução muito cara, que só poderia ser justificada se fossem utilizados inúmeras vezes. Por outro lado, as novas máquinas de produção são flexíveis o suficiente para produzir qualquer tipo de objeto a partir de modelos digitais, sem a necessidade de moldes. Sendo assim, a repetição não é mais um pré-requisito, o que torna agora economicamente viável a produção industrial de objetos diferenciados. Por esta razão, o fabricante agora se preocupa com o número de projetos que são necessários para alimentar a máquina de modo que ela produza diferentes objetos.

Pottman et al (2007) afirmam que as raízes da fabricação digital remontam à década de 1950. A invenção das máquinas de controle numérico criou uma demanda de maneiras mais sofisticadas de entrada de dados. A primeira tentativa de transformar a forma em representação numérica para esse tipo de máquina era baseada em um rastreamento de desenhos para digitalizar a informação. Ficou claro rapidamente que a maneira matemática de descrever a geometria era necessária para qualquer progresso real à medida que iam surgindo novas geometrias com curvas e formas não euclidianas, colaborando para o uso mais eficiente das máquinas de controle numérico na produção de protótipos e de produtos finais.

Hoje, os projetos não são somente criados digitalmente, mas também fabricados por meios digitais, por processos controlados numericamente por computador (CNC), chamados de processos file-to-factory. A tradução literal do termo file-to-factory como sendo “do arquivo para a fábrica”, se caracteriza pela comunicação direta do modelo com as máquinas de corte programáveis. Segundo Oosterhuis (2005), este processo se refere a uma mesclagem entre o processo de projeto e a fabricação, envolvendo a transferência direta de dados a partir de um software para uma máquina CNC. Para ele, tanto as estratégias de projeto como a fabricação digital são hoje baseadas em conceitos computacionais.

6 Discussão

As técnicas de fabricação digital, no passado consideradas experimentos na geração abstrata da forma, são hoje fundamentais na redefinição de metodologias da prática da Arquitetura que apresentam uma ligação entre a geração de formas e sua produção digital (KLINGER, 2007). Este trabalho teve como objetivo caracterizar e exemplificar os sistemas generativos de projetos e estabelecer sua relação com os novos meios de produção digital. O uso desses sistemas aliados à produção automatizada exige o domínio de ao menos duas técnicas de representação das formas, a icônica e a simbólica, além do conhecimento de características geométricas específicas dos equipamentos de fabricação por controle numérico.

Frente à diversidade de possibilidades de produção automatizada, a utilização de sistemas generativos no processo de projeto permite a criação automatizada de uma gama de alternativas para a geração de famílias de elementos por meio da utilização destas novas ferramentas de produção personalizada. Hoje, a elaboração de projetos segundo um processo tradicional torna-se incoerente quando associada às novas formas de produção por meio da fabricação digital. A manufatura de diferentes elementos de uma mesma família de objetos pelo processo convencional, por outro lado, necessitaria da execução de inúmeros projetos com pequenas variações, além de inúmeros moldes ou ferramentas específicas, o que demandaria mais tempo e recursos.

Os sistemas generativos automatizados podem ser utilizados para gerar a variedade desejada de soluções projetuais que serão concretizadas por meio da utilização da fabricação digital, ambas baseadas em conceitos computacionais, como Fischer e Herr (2001) descrevem claramente:

“In contrast to industrial manufacturing (...), generative design leaves the monotony of production up to the computer and at the same time overcomes and voids the monotony of products” (FISCHER E HERR 2001, p.2).

No que se refere aos modelos de representação utilizados na implementação de sistemas generativos, é importante notar que os modelos icônicos, tal como definidos por Mitchell (1975), não são mais suficientes para esse tipo de manipulação e nem para a fabricação digital das formas. Os modelos simbólicos definidos pelo mesmo autor (modelos matemáticos), assim como os análogos (modelos de avaliação e desempenho), são cada vez mais utilizados no processo de geração das formas. Em resumo, a representação não deve mais se restringir apenas à iconografia, pois a cada dia a forma estática perde importância para as formas definidas por meio de parâmetros e regras, e essas só podem ser representadas por meio de modelos simbólicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, que contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho, por meio dos auxílios 09/50479-5, 08/57853-7, 05/55309-0, 06/59989-8 e 12/10498-3.

Referências

BENTLEY, P. J. **Evolutionary design by computers**. São Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1999.

BLOCH C J.; KRISHNAMURTI R. The counting of rectangular dissections. **Environment and Planning B: Planning and Design**, Londres, n. 5, 1978, p. 207-430.

CARPO, M. La desaparición de los idénticos. La estandarización arquitectónica en la era de la reproductibilidad digital. In: ORTEGA, Lluís (Org.). **La digitalización toma el mando**. Barcelona: Editorial Gustavo Gilli, 2005, p. 59-65.

CASALAINA, V.; RITTEL, H. Morphologies of floor plans. **Conference on Computer-Aided Building Design**, 1967.

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

CONWAY, J. H. Game of Life, 1970. Applet interativo disponível em: <http://www.bitstorm.org/gameoflife/>. Acesso em 29 de abril de 2010.

DURAND, J. N. L. **Précis des leçons d'architecture données à l'École royale polytechnique**. Paris: Chez l'auteur, 1809.

EASTMAN, C. Cognitive processes and ill-defined problems: a case study from design. In: **Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence**. Washington: MITRE corporation, 1969. p.669-690.

FISCHER, T. and HERR, C. M. Teaching generative design, In: **Proceedings of the 4th International Generative Art Conference**. Milao: Ed. SODDU, 2001. Disponível em: <<http://www.generativeart.com>>. Acesso em: 10 de Abr. 2004.

FRAZER J.H., An evolutionary architecture. Londres: Architectural Association, 1995. Disponível em: <<http://www.aaschool.ac.uk/publications/ea/intro.html>>. Acesso em: 25 de abr. 2010.

GARZA, A. G. S.; MAHER, M. L. Evolving design layout cases to satisfy Feng Shui constraints, 1999. Disponível em: <<http://citeseer.ist.psu.edu/238434.html>>. Acesso em: 25 de abr. 2010.

GERO, J.; SCHNIER, T. Evolving Representations of Design Cases and their use in Creative Design. **Preprints of Computational Models of Creative Design**, Gero, J., Maher M.L., Sudweek, F., (Editors), Key Center of Design Computing, 1995, p. 343-368.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Cambridge: MIT Press, 1992.

KLINGER, K. Information Exchange in Digitally Driven Architecture. In: **Sigradi 2007**, 11., Cidade do México, 2007, p. 300-304.

KNIGHT, T. Shape grammars in education and practice: history and prospects. **International Journal of Design Computing**, Sydney: University of Sydney, v. 2, 1999.

KNIGHT, T. Palestra sobre “Shape Grammars: visual computing”, proferida na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Unicamp, Campinas, 2011.

KOLAVERIC, B. **Architecture in the digital Age: Design and Manufacturing**. Oxford: Taylor & Francis, 2005.

KREJCIRIK, M. (1969) Computer-Aided Plant Layout. **Computer-Aided Design**, Berkeley: Autumn press, v. 2, nº 1, 1969, p. 7-19.

LEVIN, P. H. Use of Graphs to Decide the Optimum Layout of Buildings. **The Architects Journal**, Nova Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers v. 7, nº 10, 1964, p. 170-178.

LLULL, Ramon. **Selected works of Ramon Llull (1232–1316)**. Tradução: Anthony Bonner. Princeton: Princeton University Press, 1985.

MANDELBROT, B.B. **The fractal geometry of nature**. Nova York: W.H. Freeman and Company, 1982.

MARCH, L.; EARL, C.F. On counting architectural plans. **Environment and planning B: Planning and Design**, Londres, v. 4 nº 1, 1977, p. 57-80.

MARCH, L.; STEADMAN, P. **The geometry of environment - an introduction to spatial organization in design**. Londres: RIBA Publications, 1971.

MARTIN, Edward. John Conway's Game of Life (s/ data). Disponível em: <<http://www.bitstorm.org/gameoflife/>> Acesso em: 06 de mai. 2010.

MITCHELL, W. J. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. **Environment and Planning B: Planning and Design**, Londres, n. 2, 1975, p. 127-150.

MITCHELL, W.J., STEADMAN, J.P., LIGGETT, R.S. Synthesis and optimization of small rectangular floor plans. **Environment and Planning B: Planning and Design**, Londres, n. 3, 1976, p. 37-70.

MONEDERO, J. Parametric design - a review and some experiences. In: **Proceedings of 15th ECAADE**. Viena: Vienna University of Technology, 1997.

OOSTERHUIS, K. **File to factory and real time behavior in ONL-Architecture**. 2005. Disponível em: <<http://www.oosterhuis.nl/quickstart/index.php?id=457>> Acesso em: 10 de jul. 2008.

PALLADIO, Andrea. **The Four Books of Architecture**. Boston: The MIT press, 2002 (or. 1570).

POON, J.; MAHER, M. L. Co-evolution and emergence in design. **Artificial Intelligence in Engineering**, Amsterdam: Elsevier, v. 11, nº 3, 1997, p. 319-327.

POTTMANN, H. et al. **Architectural Geometry**. Londres: Bentley Institute Press, 2007.

SIMON, H. A. The logic of decision and action. In: **The logic of decision and action**. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1967.

STEADMAN, P. Graph theoretic representation of architectural arrangement. **Architectural Research and Teaching**, Londres: RIBA publications, nº 2, 1973, p.161 – 172.

SHAVARA, Marilene. *Adaptive façade* - a cellular automata building façade driven by artificial Neural Network. **Vague Terrain, Digital Art, Culture and Technology**. 2010. Disponível em: <<http://vagueterrain.net/journal16/marilena-skavara/01>> Acesso em: 06 de mai. 2010.

STINY G and GIPS J. Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture In: **Information Processing 71**. Amsterdam: North-Holland, 1972. p. 1460-1465.

TERZIDIS, K. **Algorithmic architecture**. Burlington, MA: Architectural Press, 2006.

WHITEHEAD, B., ELDARS, M.Z. An approach to the optimum layout of single storey buildings. **The Architects Journal**, Londres: RIBA, n.17, 1964, p. 1373-1380.

YESSIOS, C. I. A Fractal Studio. In: **Proceedings of the Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)**. Carolina do Norte: University of North Carolina press, 1987.