

ANDRÉ ARAUJO E GABRIELA CELANI

# Interpretações Arquitetônicas dos Autômatos Celulares: conceitos e aplicações recentes

*Architectural Interpretations of Cellular Automata: definitions and recent  
developments*

### André Araujo

Arquiteto e mestre em estruturas pela UFV e doutor pela Unicamp com período sanduíche no Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT). Desde 2017 é pesquisador e docente da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e Design da Universidade Federal de Uberlândia, onde fundou e coordena o Laboratório de Modelagem Baseada em Informação (IN FORMA 3D), dedicado ao desenvolvimento de tecnologia nas áreas de Building Information Modeling, Design Paramétrico, Generativo, Responsivo e Adaptativo, Realidade Virtual e Aumentada e Fabricação Digital. Atualmente coordena o projeto FAPEMIG APQ-01926-17: Automatização de Processos Projetuais em Arquitetura e Urbanismo: prática e reflexão, é membro do comitê científico das associações Computer-Aided Architectural Design Research, na Ásia (CAADRIA) e Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital (SIGRADI), na América do Sul, além de parecerista ad hoc da FAPESP e dos periódicos 'PARC' (Unicamp) e 'Arquitetura Revista' (Unisinos).

*Architect and Master of structures by UFV and Ph.D. by Unicamp with a sandwich period at Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT). Since 2017 he is a researcher and professor at the Faculty of Architecture, Urban Planning and Design at the Federal University of Uberlândia, where he founded and coordinates the Information Based Modeling Laboratory (IN FORMA 3D), dedicated to the development of technology in the areas of Building Information Modeling, Design Parametric, Generative, Responsive and Adaptive, Virtual and Augmented Reality and Digital Manufacturing. Currently he coordinates the FAPEMIG project APQ-01926-17: Automation of Projective Processes in Architecture and Urban Planning: practice and reflection, is a member of the scientific committee of Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) and Ibero-American Society of Digital Graphics SIGRADI), in South America, as well as ad hoc advisor of FAPESP and the periodicals 'PARC' (Unicamp) and "Arquitetura Revista" (Unisinos).*

**andre.araujo@ufu.br**

**Gabriela Celani**

Arquiteta e Mestre pela FAU-USP e PhD pelo MIT. Professora Titular na Unicamp e Pós-doutora pela Universidade Técnica de Lisboa. Desde 2004 é pesquisadora e docente do curso de Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, onde criou o Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção (LAPAC) e o grupo de pesquisas Teorias e Tecnologias Contemporâneas Aplicadas ao Projeto. É membro do comitê científico dos congressos Design Computing and Cognition, SIGRADI, ECAADE, CAADRIA e CAAD Futures, entre outros; é consultora ad hoc da FAPESP, CAPES, CNPq, FAEPEX e MacPesquisa; tem atuado como parecerista ad hoc das revistas Design Studies, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Journal of the Faculty of Architecture/YILDIZ University, Pós/FAU-USP, Arquitectos, PARC, Cadernos de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo/FAU Mackenzie, Gestão & Tecnologia de Projetos/IAU-USP, Oculum/PUCCamp e v!rus/IAU-USP, CADERNOS PROARQ, entre outros. É membro titular do Conselho Superior do Museu Exploratório de Ciências da Unicamp e Diretora (2015).

*Architect and Master's degree from FAU-USP and PhD from MIT. Full Professor at Unicamp and Post-doctorate at the Technical University of Lisbon. Since 2004 she is a researcher and professor in the Architecture and Urban Planning course at Unicamp, where she created the Laboratory of Automation and Prototyping for Architecture and Construction (LAPAC) and the research group Theories and Contemporary Technologies Applied to the Project. She is member of the scientific committee of the Congresses Design Computing and Cognition, SIGRADI, ECAADE, CAADRIA and CAAD Futures, among others; is ad hoc consultant of FAPESP, CAPES, CNPq, FAEPEX and MacPesquisa; she has acted as ad hoc advisor of the journals Design Studies, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Journal of the Faculty of Architecture / YILDIZ University, Post / FAU-USP, Architects, PARC, Postgraduate Studies in Architecture and Urban Planning/ FAU Mackenzie, Project Management & Technology / IAU-USP, Oculum / PUCCamp evolus / IAU-USP, CADERNOS PROARQ, among others. She is a titular member of the Superior Council of the Exploratory Museum of Sciences of Unicamp and Director (2015).*

**celani@fec.unicamp.br**

### Resumo

Sistemas generativos de projeto surgiram a partir da busca por estratégias capazes de explorar formas arquitetônicas usando o computador como um mecanismo gerador de alternativas. Nesse contexto, os autômatos celulares (CA) despertaram a atenção de arquitetos e urbanistas como uma estratégia caracterizada, de um lado, por um mecanismo de fácil programação e, de outro, por produzir resultados potencialmente complexos e inesperados. No presente artigo apresenta-se uma revisão sobre as principais utilizações dos autômatos celulares nos estágios iniciais do processo de projeto em Arquitetura. Depois de apresentar definições sumárias para a compreensão de conceitos básicos, discutem-se como algumas aplicações recentes se apropriaram dessa noção para explorar o tema da complexidade nesses campos. Além disso, buscou-se identificar lacunas ainda não exploradas pelos pesquisadores da área, construindo hipóteses para os rumos da pesquisa científica dentro do campo investigativo do Design Computacional.

**Palavras-chave:** Sistemas generativos. Autômatos celulares. Estado da arte.

### Abstract

*Generative design approaches have emerged from the search for strategies to facilitate the exploration of alternative solutions in design, using computers as variance-producing engines to navigate through unexpected results. In this context, cellular automata (CA) have received attention from architects and urban planners as a generative strategy that is characterized by the simplicity of its mechanisms on one hand and the potential complexity of its outcomes on the other. This paper presents a review of Cellular Automata techniques used as a creative tool in the early stages of design for Architecture. Firstly, we summarize some definitions to elucidate basic concepts and then we show how recent research has investigated complexity in those fields using cellular automata. Moreover, we have searched for scientific gaps and built hypotheses to predict future trends in Computational Design Science.*

**Keywords:** Generative systems, Cellular automata, State of art.

## Introdução

A ideia sobre sistemas complexos não é recente e teve incrementos significativos ao longo do século XX. Desde a noção evolucionária dos filósofos pós-darwinistas, até a mudança de paradigma proposta por Kuhn (1962), a complexidade dos sistemas passou a ser entendida por meio de um viés analítico: os níveis de organização identificáveis (WEAVER, 1948). Enquanto algumas complexidades apresentam como característica a instabilidade individual, outras apresentam estabilidade e organização em nível coletivo, podendo ser classificadas como organizadas (CORNING, 2002).

Sistemas complexos organizados foram estudados pelas ciências naturais e promoveram avanços significativos no entendimento de cardumes de peixes, colônias de insetos ou sistemas imunológicos, por exemplo. Grande parte desses estudos identificaram ações descentralizadas que produzem uma espécie de inteligência coletiva que emerge de hierarquias *bottom-up*<sup>1</sup> (GORDON, 1999). Essa inteligência permite que essas populações respondam a um estímulo externo de maneira conjunta, aprendendo com a experiência. O aprendizado conjunto surge da influência mútua, por meio de ações e reações entre os indivíduos, e esse tipo de organização faz desses sistemas naturais complexos e adaptativos (JOHNSON, 2003).

Nas últimas décadas, a Matemática Não-Linear e a Ciência da Computação permitiram a reprodução artificial dessa inteligência, modelando as interações entre os indivíduos, denominados desde então por agentes (HOLMAN, 2010). A Computação Natural é o campo da Ciência da Computação destinado a propor algoritmos inspirados em processos naturais, em grande parte biológicos (DE CASTRO e VON ZUBEN, 2005).

A bioinspiração produziu dispositivos muito conhecidos, como o sonar, inspirado no mecanismo de eco localização dos morcegos. Atualmente, algoritmos de busca, otimização, ou geradores de alternativas para um único problema têm sido desenvolvidos utilizando termos próprios da Biologia, como “crossing over”, “seleção natural” e “células”. Estas noções contribuíram fundamentalmente para a modelagem de problemas complexos do cotidiano, como a simulação de redes neurais (MITCHELL, 2009). Nos anos 1990, Frazer (1995) e Jencks (1997) observaram a influência desse tipo de computação também na Arquitetura e no Urbanismo, em especial no desenvolvimento de sistemas generativos de projeto.

Os sistemas generativos foram definidos por Fischer e Herr (2001) como uma estratégia de projeto na qual se elaboram métodos para a produção de soluções potenciais em detrimento de uma única solução. Dentro desse contexto, Batty (2005) identificou três tipos de abordagens inspiradas na Biologia que utilizam hierarquias *bottom-up* para a estruturação dos problemas:

- Modelagem baseada em agentes: modelos que simulam ações e interações dinâmicas entre agentes autônomos, a fim de verificar seus efeitos no sistema como um todo;
- Fractais: modelos baseados em definições matemáticas que exibem geometrias repetitivas e autossimilares em diferentes escalas, observados com frequência na natureza;
- Autômatos celulares: modelos baseados em espaços estáticos cujo preenchimento é dinâmico e se altera ao longo de instantes discretos de tempo.

Este artigo apresenta uma revisão sobre os recentes desenvolvimentos que utilizaram os autômatos celulares para a investigação de problemas de Arquitetura nos ambientes de Computer-Aided Design (CAD). Após apresentar algumas definições sumárias,

<sup>1</sup> Na Biologia, hierarquias *bottom-up* são mecanismos por meio dos quais as propriedades funcionais surgem da interação entre componentes conhecidos (Bruggeman e Westerhoff, 2007).

discutem-se as principais aplicações desse conceito, buscando identificar lacunas ainda não exploradas pelos pesquisadores e construindo algumas hipóteses sobre as futuras tendências do Design Computacional aplicado à Arquitetura.

## Autômatos Celulares: conceitos

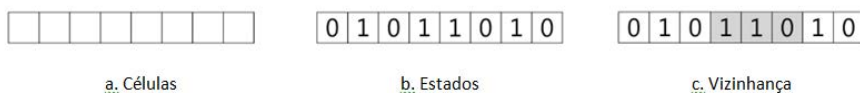
Os autômatos celulares<sup>2</sup>, tratados a partir de agora por CA, foram uma resposta dos pesquisadores John Von Neumann e Stanislaw Ulam para um famoso problema matemático da década de 1940, que objetivava a definição de uma máquina capaz de se autorreproduzir (VON NEUMANN e BURKS, 1966). Estes pesquisadores propuseram quebrar o processo contínuo de reprodução em partes, por meio de um modelo teórico de uma malha de espaços quadrados vazios que chamavam de células, as quais eram preenchidas com cores a partir de um número reduzido de regras iterativas. O resultado dessa experiência foi a definição matemática da máquina conhecida como Construtor Universal, que se autorreplicava a partir de dígitos e operações lógicas (ERMENTROUT e EDELSTEIN-KESHET, 1993).

Essa artimanha de preencher quadrados com alguma informação a partir de regras recebeu diversos nomes como cellular spaces, tessellation automata e iterative arrays, até alcançar a nomenclatura atual, cellular automata. Um autômato celular é definido como uma coleção de células “coloridas” capazes de alterar suas “cores” com base nas “cores” das células vizinhas ao longo de instantes de tempo. As “cores” são, na verdade, os estados que a célula pode assumir tornando-a igual ou diferente das demais. Minimamente, devem existir dois estados, como branco ou preto, 0 ou 1 ou vivo ou morto, por exemplo (WOLFRAM, 1986).

Os elementos fundamentais de um autômato celular são: as células, os estados e as vizinhanças<sup>3</sup> (Figura 1a-c). As células são espaços adjacentes que passam a “existir” ao serem preenchidas por um estado. Os estados são as instâncias que a célula pode assumir, como cores ou números. A vizinhança representa a influência mútua entre as células, isto é, as células influenciam os estados de outras células, ao mesmo tempo em que os seus próprios estados são influenciados. A forma de vizinhança mais simples é composta por três células: uma central, um vizinho à esquerda e um à direita e a disposição das mesmas em fita caracteriza o CA como unidimensional (ILACHINSKI, 2001).

FIGURA 1 – Elementos fundamentais de um autômato celular.

Fonte: Ilustração nossa.



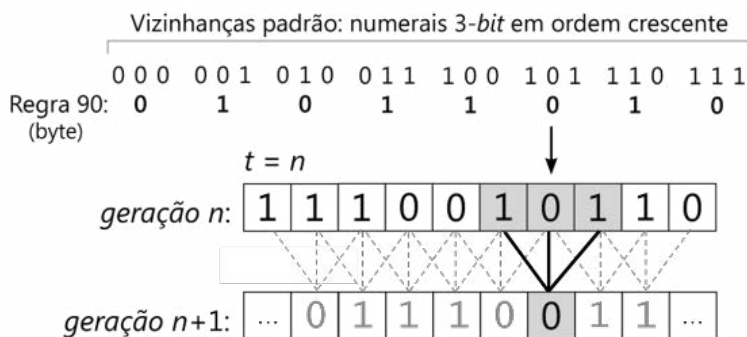
<sup>2</sup> Optou-se por utilizar a abreviatura CA, que designa o termo autômatos celulares conforme utilizado no inglês: cellular automata, plural de cellular automaton, em virtude de sua ampla difusão no Design Computacional.

<sup>3</sup> OEm notação algébrica, a quantidade de estados é denotada pela letra  $k$ ;  $k = 2$  significa que o autômato celular tem dois estados, por exemplo. Já a quantidade de vizinhos é denotada pela letra  $r$ , que corresponde ao raio da vizinhança;  $r = 1$  significa que o autômato celular tem um vizinho à esquerda e um vizinho à direita da célula central, portanto três células para o caso de um autômato celular unidimensional (CA1D).

Uma fita de células representa uma geração em um CA1D e na próxima geração do autômato, uma célula pode ou não trocar de estado dependendo de sua vizinhança, a qual é atribuída um estado correspondente. Na Figura 1c, por exemplo, a vizinhança '110', em destaque, pode corresponder a um dos dois estados (0 ou 1) na próxima geração. Em geral, a geração inicial, ou primeira fita de células, é sempre preenchida por uma única célula preta (ou 1) ao centro e por células brancas (ou 0's) em suas duas laterais: (...000010000...). As fitas ou gerações subsequentes são posicionadas logo abaixo da geração anterior, ou seja, a segunda geração é posicionada imediatamente abaixo da geração inicial (SCHIFF, 2008).

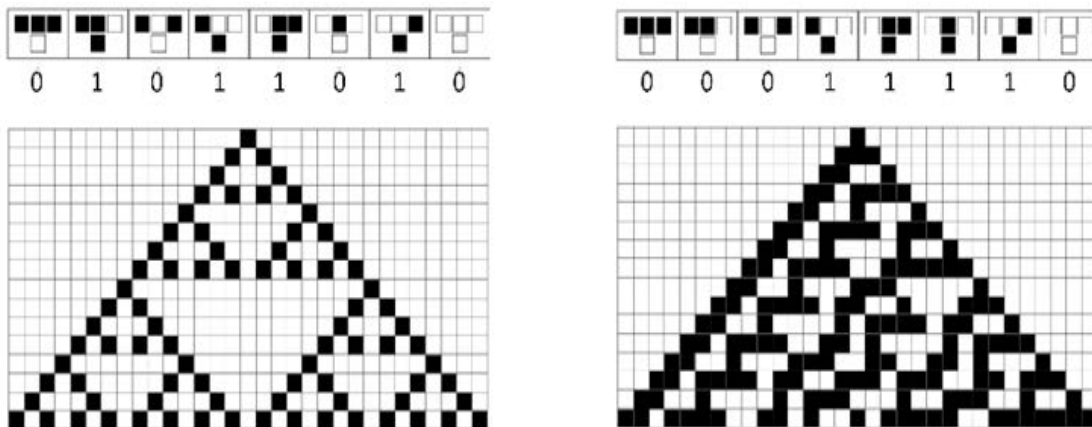
Ao preencher três células com dois estados binários tem-se um numeral 3-bit, assim chamado na Ciência da Computação. Desse modo, são possíveis oito tipos de numerais 3-bit, denominados, no contexto dos CA, de vizinhanças padrão, denotadas sempre em ordem crescente: (000); (001); (010); (011); (100); (101); (110); (111). Ao atribuir o estado '1' à vizinhança 100, define-se que o algarismo central '0' dessa vizinhança se torne '1' na próxima geração. Assim, sempre que a sequência 100 aparecer na geração de um autômato, em sua próxima geração aparecerá o algarismo 1, no lugar do 0 ao centro. Para cada vizinhança pode-se atribuir um estado, o que produz oito estados, como estes: 01011010. Um numeral de 8 dígitos binários, conhecido como binary digit ou simplesmente byte é chamado de Regra nos CA e é denotado pela correspondência decimal dos oito estados. O 01011010, por exemplo, corresponde ao número 90 em base 10, portanto essa regra é chamada de Regra 90 (Figura 2).

FIGURA 2 – Exemplo de uma regra estabelecida a partir das vizinhanças padrão  
Fonte: Ilustração nossa.



Do mesmo modo que a palheta de cores RGB, que gera 256 tons a partir da combinação dos estados vermelho, verde e azul, existem 256 regras para os CA1D na condição  $k = 2$ ;

$r = 1$ . Esta condição, que é também a mais fundamental de um CA, gera padrões gráficos muito distintos quando se empilham várias gerações. As 256 regras fundamentais foram organizadas segundo a perspectiva dos sistemas dinâmicos e, sob essa classificação, elas podem ser fixas, periódicas, complexas ou caóticas (LANGTON, 1986). A aplicação sucessiva da Regra 90, por exemplo, produz um resultado periódico, autosimilar e simétrico, idêntico ao triângulo de Sierpi ski (Figura 3a). Já a Regra 30 (ou 00011110), produz um resultado caótico, de geometria pseudoaleatória, tal como uma simulação estocástica para o sorteio de números (Figura 3b). Essas geometrias são mais bem observadas utilizando a notação cromática, com estados branco e preto.



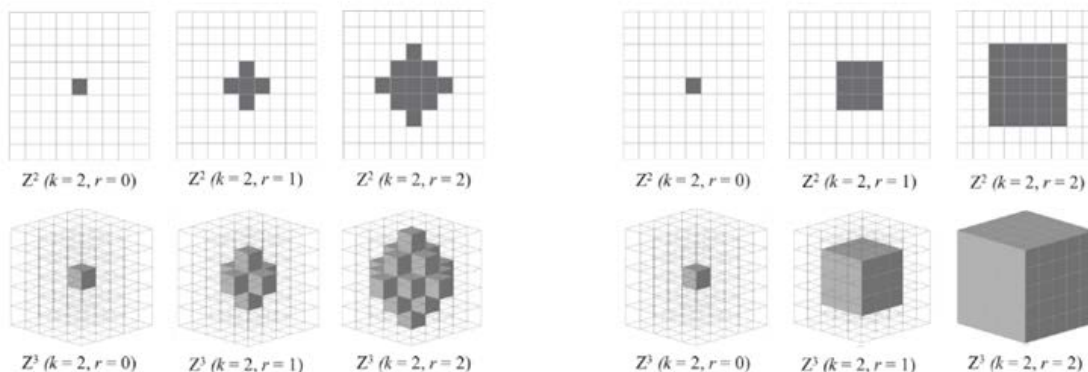
a. Regra 90: periódica

b. Regra 30: caótica

FIGURA 3 – Dois CA1D que exibem geometrias distintas utilizando os estados preto e branco.

Fonte: adaptado de Wolfram, 2002 p. 25 e p. 27.

Nos espaços vetoriais bidimensionais e tridimensionais ( $Z^2$  e  $Z^3$ ), os CA2D e CA3D são definidos utilizando os mesmos conceitos dos unidimensionais, com uma diferença importante na maneira de exibição dos resultados. Enquanto nos CA1D as fitas de células são empilhadas, nas malhas XY e XYZ os resultados são mostrados geração após geração, como quadros de um desenho animado. Além disso, as malhas 2D e 3D permitem experimentar diversos tipos de vizinhanças e duas delas foram tradicionalmente mais utilizadas: a Vizinhança de Neumann em que, na condição mínima ( $k = 2$ ;  $r = 1$ ), uma célula central é influenciada por 4 ou 6 vizinhos; e a Vizinhança de Moore, que considera a influência de 8 ou 26 vizinhos, para os CA2D e os CA3D, respectivamente (Figura 4). Vale a pena ressaltar uma das mais famosas explorações dos CA desenvolvida nos primeiros computadores pessoais na década de 1970, conhecida por



a. Vizinhança de Neumann

b. Vizinhança de Moore

FIGURA 4 – Autômatos celulares bidimensionais e tridimensionais.

Fonte: Ilustração nossa.



Jogo da Vida (GARDNER, 1970). Nesse jogo, o matemático inglês John Conway propôs as seguintes regras para um CA2D, utilizando a Vizinhança de Moore:

- **Morte** – uma célula viva (preta) morrerá (se tornará branca) nas circunstâncias de:
  - i. Superlotação: se a célula possuir 4 ou mais vizinhos;
  - ii. Solidão: se a célula possuir 1 ou menos vizinhos;
- **Nascimento** – uma célula morta (branca) nascerá (se tornará preta) se:
  - i. Possuir exatamente três vizinhos vivos (nem mais, nem menos);
- **Êxtase** – uma célula mantém seu estado intacto em duas situações:
  - i. Permanece viva: se tem exatamente 2 ou 3 vizinhos vivos;
  - ii. Permanece morta: se tem qualquer quantidade de vizinhos diferente de 3.

A jogabilidade do Jogo da Vida se difere de um jogo de computador convencional, no qual o jogador define ações constantemente. Neste caso, o jogador define somente a geração inicial para que o jogo produza diferentes “formas de vida”. O Jogo da Vida despertou a atenção de diversos pesquisadores das áreas de Matemática e Ciência Computação por produzir resultados intrigantes. Em algumas gerações iniciais, as células simplesmente morrem depois de poucas gerações; noutras as células alternam indefinidamente entre duas ou mais disposições. Nos casos mais curiosos, a sucessão de formas parece dar vida ao autômato, produzindo formas concretas que parecem ter movimento (WEISSTEIN, 2013; SILVER, 2013).

## Design de arquitetura baseado em Autômatos Celulares

Ao longo das últimas duas décadas, os CA foram difundidos na Arquitetura juntamente com a melhoria dos aplicativos CAD, sendo utilizados de diferentes maneiras dentro do processo de projeto. Suas aplicações recentes podem ser organizadas de acordo com dois vieses centrais, ambos ligados à investigação de formas ou *form-finding*<sup>4</sup> : 1) exploração do potencial generativo formas; 2) simulação artificial das noções de auto-organização, responsividade e adaptação.

### Potencial generativo

Juntamente com outros tipos de sistemas generativos, a computação baseada em CA permite a definição de fundamentos para a geração de formas, as quais podem ser acessadas, manipuladas, experimentadas e, conseqüentemente, melhoradas. Com

<sup>4</sup> Em alguns contextos, como na Engenharia de Estruturas, a expressão *form-finding* é comumente associada aos processos de otimização, isto é, o refinamento de uma solução tendo em vista melhorar um ou mais critérios. Na Arquitetura a expressão equivale aos processos de investigação de soluções, computacionais ou não, que quebram relações previsíveis entre forma e representação, permitindo o desenvolvimento de novas topologias. Eles mudam a ênfase do processo criativo de “fazer formas” para “encontrar formas” (Kolarevic, 2003).

esse raciocínio, Schrandt e Ulam (1970) propuseram os primeiros experimentos visando à exploração de formas com CA. Na ocasião, as formas foram geradas a partir de scripts e representadas com blocos de madeira. Depois disso, durante as décadas de 1970 e 1980, praticamente não houve estudos significativos com os CA para a Arquitetura, embora na Ciência da Computação sua investigação tivesse continuado. Somente com os estudos de Bays (1987), os CA, o estudo de operações geométricas como extrusão, rotação e translação, puderam ter alguma relevância para o processo criativo de projeto.

Alguns eventos da década de 1990 contribuíram para a difusão dessa e de outras aplicações, dentre eles a aquisição da linguagem VisualLisp pela empresa Autodesk, Inc., incorporando-a ao aplicativo AutoCAD. Já neste ambiente de design gráfico e scripts, a implementação proposta por Coates et al. (1996) pode ser considerada uma das primeiras a produzir resultados mais contundentes. Os autores combinaram CA com laços recursivos e avaliaram os resultados produzidos à luz de alguns conceitos

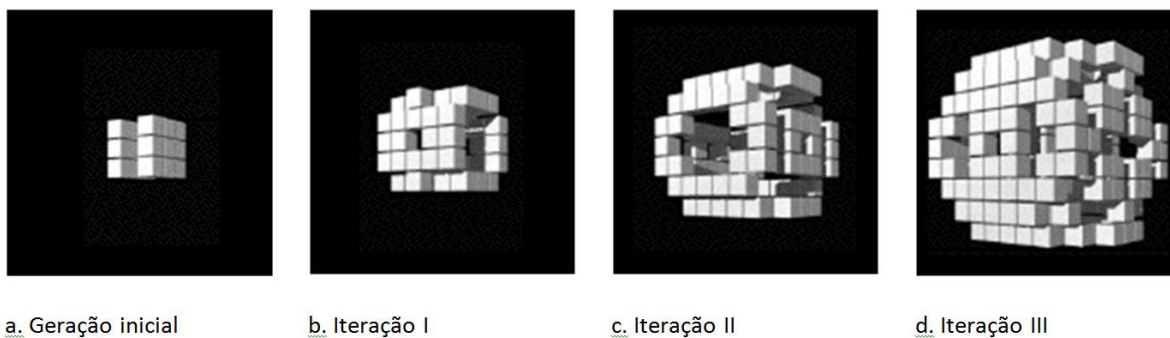


FIGURA 5 – Um dos experimentos que resultaram em estruturas envelopadas, similares as paredes de um edifício.

Fonte: Coates et al., 1996, p. 4.

próprios da Arquitetura. A partir de um modelo que combinava blocos de células, os autores observaram como a forma gerada poderia se aproximar ou se distanciar da forma de alguns elementos arquitetônicos ao longo das gerações (Figura 5a-d).

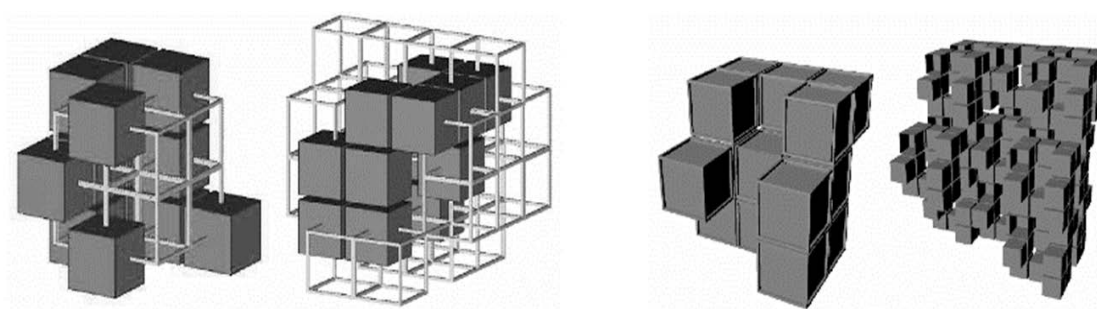
Com um viés mais artístico, Caillaud (2001) também buscou vincular os resultados produzidos a partir dos CA com conceitos das Artes Plásticas. Utilizando operações geométricas simples, o autor investigou como algumas iterações poderiam ter impacto no processamento de imagens. A partir de regras que produziam efeitos como rotação e simetria, foram estabelecidas correspondências cromáticas para obter processos de anamorfismo e anacromismo, que produzem transformação, distorção ou recombinação de formas ou de cores.

Outros processos semelhantes aos CA foram desenvolvidos no mesmo período e, com uma analogia biológica, foram chamados de morfogênese digital. As superfícies morfogenéticas introduzidas por Testa et al. (2000) emergiam dentro de um espaço virtual a partir da ação de atratores e repulsores que dirigiam o seu crescimento. Utilizando scripts dentro de ambientes CAD, os pesquisadores traduziam as ações de atração

e repulsão por meio de axiomas sequenciais representados por caracteres textuais, similar à gramática conhecida por L-Systems (Lindenmayer, 1968), que utilizava a mesma codificação textual para descrever o crescimento de plantas.

Após esses experimentos, os anos 2000 experimentaram um ponto de inflexão dentro da história do CAD, que foi o encapsulamento dos códigos de programação em componentes visuais, atualmente difundidos por meio de aplicativos como o Generative Components (Bentley Inc.), o Grasshopper (McNeel Inc.) e o Dynamo Studio (Autodesk Inc.). A partir de então, o termo modelagem paramétrica se popularizou entre os arquitetos como uma definição para os processos de modelagem que utilizam scripts de programação, encapsulados ou não.

Já dentro desse ambiente de programação visual, Devetakovic et al. (2009) obtiveram formas de elevada complexidade utilizando CA3D. Os pesquisadores combinaram dois algoritmos executando regras simultâneas, a fim de produzir blocos cheios (shaded) e vazados (wireframe). Desse modo, foram obtidas geometrias de elevada complexidade com formas fragmentadas e alguns processos de autossimilaridade, denominados neste estudo por “fractalização” (Figura 6a,b).



a. Combinações de blocos cheios e vazados.

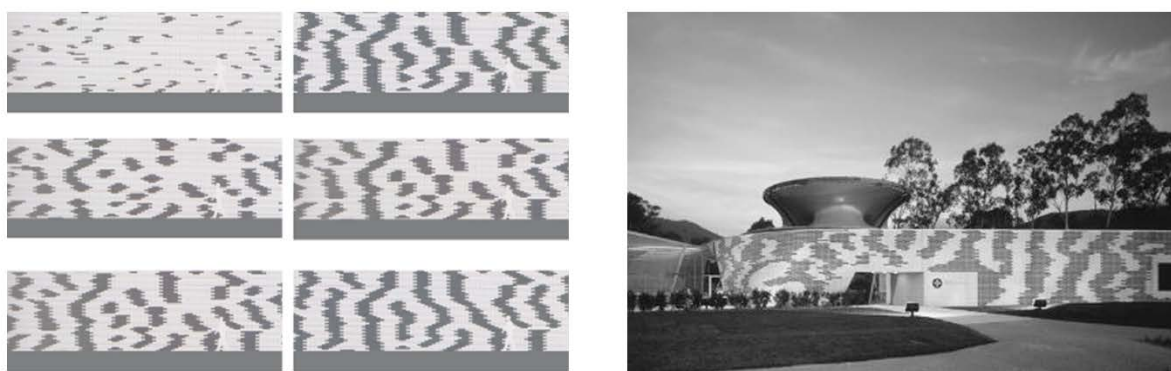
b. Fractalização

FIGURA 6 – Processos de geração de formas complexas a partir de autômatos celulares.

Fonte: Devetakovic et al., 2009, p. 190.

Juntamente com a evolução experimentada pelos sistemas CAD, os sistemas de Computer-Aided Manufacturing (CAM) passaram a ser mais explorados pelos arquitetos, tanto na prototipagem, quanto na produção de edifícios. Experimentos como os de Herr e Fischer (2004) utilizaram CA e técnicas de prototipagem rápida para a obtenção de elementos de fachada dinâmicos com base nas ideias de Habraken et al. (1976) que, em síntese, propunham a melhoria dos ambientes por meio das experiências dos próprios usuários. Os pesquisadores desenvolveram um protótipo de fachada que se alterava a partir de CA. As regras eram disparadas por sensores de movimento e produziam diferentes aberturas na fachada atualizadas constantemente pelo tipo de movimento.

Na escala dos edifícios, as aplicações com CA ainda são pouco usuais e com motivos quase que exclusivamente estéticos. Um dos edifícios do zoológico Healesville Sanctuary, próximo à cidade de Melbourne, utilizou regras de CA como inspiração para suas fachadas. Nelas, o arquiteto Paul Minifie buscou reproduzir listras de uma espécie de lagartixa típica da Austrália utilizando um CA1D, representando os estados binários com duas cores de tijolos, o que gerou milhares de possibilidades. Muito além de um simples mimetismo, o partido arquitetônico pode expressar ao mesmo tempo Biologia e Computação Bioinspirada, gerando uma paginação complexa e harmonizada com as pretensões do edifício (Figura 7a,b).



a. Planos de fachada

b. Vista do edifício

FIGURA 7- CA utilizado nas fachadas de um do edifício do Australian Wildlife Health Centre, em Healesville, Austrália.

Fonte: a. Burry e Burry, 2012, p. 23. b. MVS ARCHITECTS, 2016, p. 7.

Atualmente os CA têm sido abordados em disciplinas e workshops em escolas de arquitetura com forte tradição no Design Computacional, tornando esse tipo de computação uma alternativa para os ambientes de projeção (Sayed et al., 2014). Nos processos criativos de Arquitetura, os CA abrem pelo menos duas possibilidades: 1) gerar incontáveis alternativas para um único problema; 2) produzir formas complexas a partir de regras simples. A investigação de métodos digitais que tornem viável a fabricação dessas geometrias na escala dos edifícios é uma das questões que merecerão atenção nos próximos anos. Já nos ambientes virtuais, parece clara a necessidade de explorar meios para vincular o potencial dos CA com as premissas ou necessidades de um problema de projeto. Essa ideia passa por hipóteses discutidas atualmente na Ciência da Computação, como a proposta da plataforma Mathematica (Wolfram, Co.), que propõe utilizar os CA como uma ferramenta capaz de computar variáveis abstratas e de difícil delineamento.

#### Auto-organização, responsividade e adaptação

Buscando automatizar etapas do processo de projeto, Krawczyk (2002) desenvolveu

alguns conjuntos de CA, a fim de gerar o leiaute de plantas residenciais. Para isso, o autor definiu regras em um CA2D e estabeleceu limites baseados nas áreas dos ambientes. A partir de um programa de necessidades com áreas mínimas, diferentes possibilidades de plantas puderam ser geradas e posteriormente selecionadas como solução. Dentre as principais dificuldades deste estudo, identificou-se a necessidade de definir maneiras de sobrepor as células, a fim de possibilitar a criação de circulações em diagonal. Esse experimento foi um dos pioneiros a utilizar os CA como ferramenta para organizar funções nos ambientes de projeto (Figura 8a-c).

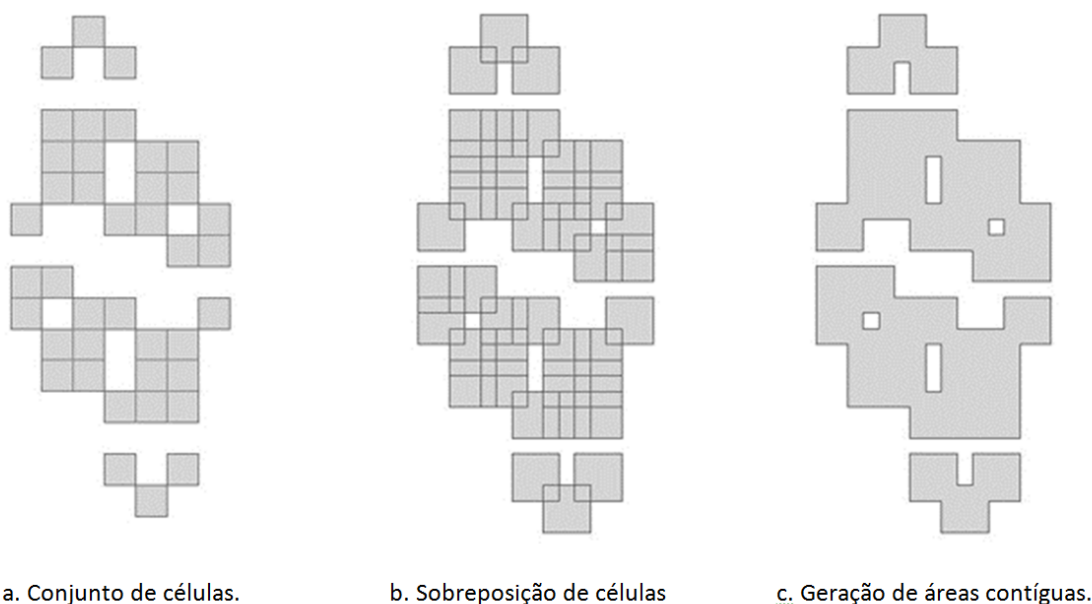


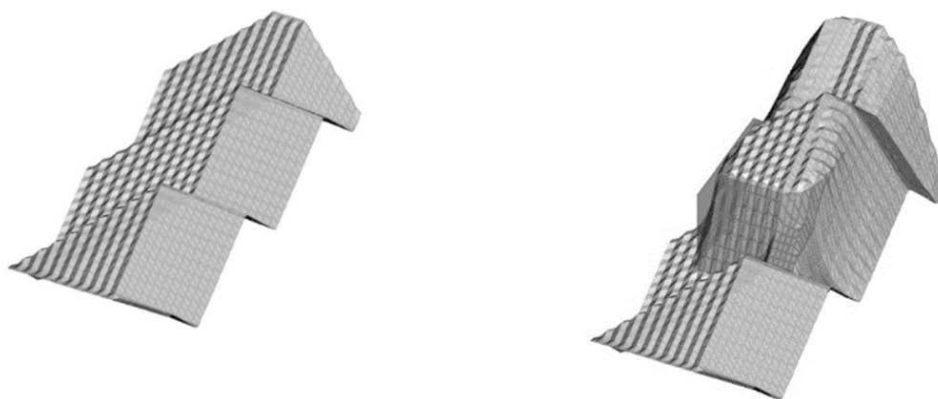
FIGURA 8– Automatização de plantas utilizando CA.

Fonte: Krawczyk, 2002, p. 74.

Derix, Simon e Coates (2003) também exploraram a auto-organização de células, a fim de gerar cenários automatizados para conjuntos de edifícios urbanos. Sobre uma malha viária preexistente, os autores sobrepueram um modelo baseado em CA para simular possíveis cenários de expansão urbana. Esses displays interativos permitiam redimensionar estruturas físicas, como larguras de vias, por exemplo, a cada inserção ou exclusão de um novo edifício. Embora trabalhando apenas com variáveis quantificáveis, os modelos permitiam produzir cenários urbanos hipotéticos de modo praticamente instantâneo.

Algumas dificuldades desses modelos foram apontadas por Fischer, Fischer e Ceccato (2002) ao discutir a necessidade de traduzir os resultados obtidos com os CA para modelos mais contínuos. De acordo com os autores, nos ambientes granulares, a medida de tempo é absoluta e está relacionada a ciclos discretos, enquanto que o grau de liberdade desejável em um ambiente projetual sugere a continuidade, de modo que o espectro de soluções não fique restrito a uma configuração modular preestabelecida. Assim, uma estratégia que conferisse uma continuidade à divisão celular dos CA se mostraria mais promissora.

Anzalone e Clarke (2003) buscaram superar essa dificuldade combinando os processos iterativos dos CA com intervenções manuais, isto é, utilizando técnicas tradicionais de modelagem. Em um dos experimentos, os autores desenvolveram um CA capaz de gerar formas semelhantes às de um relevo, sobre o qual inseriam superfícies contínuas e sinuosas em qualquer momento da iteração, obrigando as células a tomarem outro caminho. Nesse caso, além das regras convencionais dos CA, as células continham instruções condicionais capazes de determinar uma nova ação a partir de um evento externo, fazendo delas, pequenas regras dentro das regras do autômato (Figura 9).



a. Forma gerada com autômatos celulares

B. Camada externa dirigindo a composição granular.

FIGURA 9 – Adaptação do CA a um evento externo, nesse caso, a forma desviando do obstáculo.

Fonte: Clarke e Anzalone, 2003, p. 330.

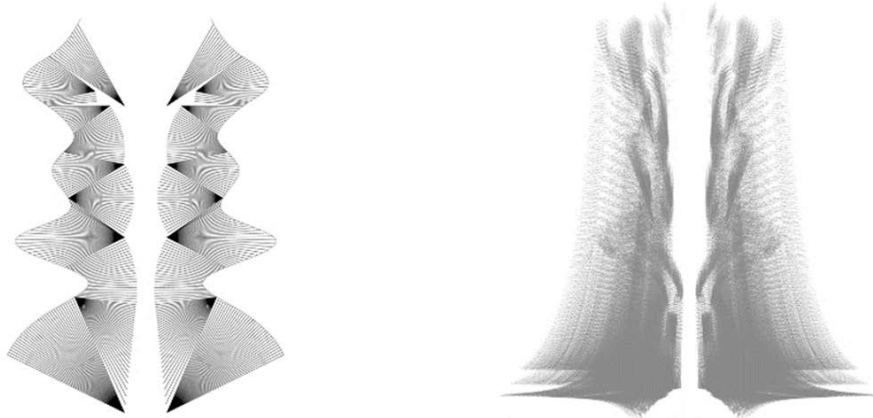
Com abordagens semelhantes, Herr e Kvan (2005, 2007) propuseram remodelar um conjunto residencial no norte do Japão, utilizando CA. No projeto original do escritório espanhol Cero9, torres inclinadas em diferentes direções produziam diversas condições de luz e sombra no sítio de implantação. Com a nova técnica de modelagem, os autores estabeleceram intervenções manuais durante os processos de iteração, por meio de técnicas convencionais, de maneira a ajustar os resultados produzidos pelos CA a diferentes condições de iluminação. De modo semelhante, Araghi e Stouffs (2015) buscaram gerar alternativas para edificações de alta densidade na Holanda, refinando os resultados obtidos com CA a partir de intervenções manuais denominadas de pós-processamento. Neste caso, também se buscaram vincular condições de iluminação natural com os estados das células, transcrevendo essa variável ambiental por meio das regras.

Esse tipo de intervenção em processos generativos tem motivado a investigação de métodos responsivos, isto é, capazes de responder a um estímulo ou intervenção externa ao sistema. Atualmente, algumas noções oriundas da Inteligência Artificial têm motivado o registro dessas respostas, de modo a utilizá-las em eventos futuros, o que caracterizaria esses modelos computacionais também como adaptativos. Na Ciência

da Computação, os Sistemas Complexos Adaptativos inseridos por Holland (1966) são modelos dinâmicos capazes de se adaptar ao serem expostos às mudanças do ambiente em que estão inseridos. O termo faz referência ao senso biológico de adaptação que, de maneira grosseira, corresponde um ajuste dos organismos ao ambiente. Nas palavras de Holland (2006), “[...] são sistemas que possuem um grande número de componentes, frequentemente chamados de agentes, que interagem, se adaptam e aprendem”.

Algumas estratégias para a reprodução dessa aprendizagem surgiram nos jogos eletrônicos, a partir da década de 1980. Em uma das tentativas mais explícitas, o jogo SimCity de Will Wright recria a evolução de uma cidade a partir da ilusão virtual de seu crescimento. A partir de agentes conectados que se rearranjam a cada nova jogada, o sistema expressa as alterações no valor dos imóveis urbanos. Algumas pesquisas da área do Planejamento Urbano exploraram essa ideia utilizando os CA, inclusive desenvolvidas por pesquisadores brasileiros (KARAKIEWICZ et al., 2015; SAKIEH et al., 2015; POLIDORI e KRAFTA, 2005)

No design de Arquitetura, a pesquisa de Adilenidou (2015) fornece ideias para simular os processos de adaptação utilizando os CA. Nesse experimento, ao invés de intervir manualmente, foram inseridos erros no processo de iteração dos autômatos, como um vírus de computador, a fim de produzir geometrias “mutantes”. Assim, o autor partiu da tipologia de uma catedral, cuja forma foi descrita por uma nuvem de pontos, a serem alterados por um CA e, posteriormente, conectados, a fim de produzir linhas e superfícies. O erro introduzido bagunçava essa nuvem após algumas gerações, o que obrigava o autômato a reagrupa-los em uma nova forma ao continuar sua iteração. (Figura 10).



a. Arranjo polar de linhas em uma disposição simétrica.

b. Reagrupamento de pontos após uma quantidade de gerações do autômato, formando uma nova geometria.

FIGURA 10 – Iterações com CA recriando o corpo central de uma catedral.

Fonte: Adilenidou, 2015, p. 606.

A ideia de “mutação” dentro de um sistema generativo bottom-up abre como alternativa aos processos de investigação da forma a definição de pressões para a sua adaptação. Diferentemente dos procedimentos de otimização, nos quais os objetivos são postos a priori, esse tipo de abordagem pode representar a inserção de uma condição mais abstrata, como uma intencionalidade que conduz a solução para um determinado rumo, mas que permite surpresas no caminho, isto é, resultados diferentes do esperado. Ao comentar o texto de Derrida (1962), Lynn (1998) afirma que a necessidade de mutações para originar uma forma ideal é mais importante do que a própria forma ideal e, desse modo, podemos afirmar que essa noção tem lugar no contexto da Arquitetura Contemporânea, da qual a ratificação de uma agenda exploratória parece ser um processo irreversível.

Como concluiu Burry e Burry (2012) a utilização de aplicativos CAD como ferramenta meramente representativa foi, por muitos anos, tolerada nas escolas de arquitetura, por uma cultura que reduziu suas potencialidades. Ao contrário disso, desde os anos 1960, o Design Computacional aplicado à Arquitetura foi um processo marcado pela investigação constante da solução formal e, atualmente, os ambientes digitais de modelagem e fabricação têm ratificado essas culturas investigativas, outrora experimentadas por arquitetos como Antony Gaudí, Heinz Isler e Frei Otto, sem o auxílio dos computadores. Há bem pouco tempo, um algoritmo capaz de buscar milhares de soluções para uma fachada de tijolos era algo completamente impensável no contexto da construção civil, o que nos leva a crer que as pesquisas atuais que envolvem auto-organização, adaptação e responsividade terão espaço muito em breve no repertório dos arquitetos.

## Conclusão

Este artigo apresentou uma revisão da literatura sobre CA com o objetivo de resgatar um método generativo pelo qual houve grande interesse, em especial nos anos 90, pela comunidade do Design Computacional, notadamente por alguns dos pesquisadores que viriam a se tornar grandes nomes na área como Michael Batty, Paul Coates e John Frazer. Burry e Burry (2012) comentam que, apesar do interesse dos arquitetos pelos métodos computacionais ter nascido naquela época, até o início dos anos 2000 haviam apenas estudos teóricos e especulativos, que só viriam a se concretizar nas primeiras décadas do século XXI. Isso de fato ocorreu com os fractais e com os métodos de otimização, como os algoritmos genéticos. Contudo, no caso específico dos CA, essa concretização foi limitada. Dentre os projetos apresentados no livro *The New Mathematics of Architecture* apenas um, conforme já descrito acima, tem o uso de CA e, ainda assim, sua aplicação restringe-se a uma composição bidimensional aplicada a uma fachada. A literatura levantada não mostra nenhum outro caso de edifício construído com o uso de CA.

Qual seria o motivo de todo esse interesse não ter conduzido a aplicações efetivas em arquitetura? Por que a única aplicação conhecida restringe ao plano bidimensional? Seria ainda possível utilizar o CA como método generativo bottom-up para a produção



de formas em arquitetura? Que ferramentas precisariam ser desenvolvidas para que os CA se integrassem ao processo de projeto dos arquitetos? Que vantagens haveria em se trabalhar com este sistema em comparação aos métodos de modelagem top-down?

Mitchell (1977) fornece pistas para responder estas perguntas ao identificar uma ruptura entre as pesquisas produzidas sobre os sistemas generativos nas universidades e a sua utilização pelos escritórios de arquitetura, a partir da redução do CAD no início dos anos 1970. Nos ambientes em que as ferramentas computacionais se destinam apenas a representar objetos de argumento estático, como pontos, retas, planos, sólidos e outros, a implementação dos sistemas generativos torna-se muito limitada. Somente com a retomada efetiva das linguagens de programação nos estágios criativos de projeto, que é recente e tem se popularizado por meio da modelagem por componentes visuais, os CA têm agora chances concretas de se inserir no repertório dos arquitetos como uma alternativa projetual viável e promissora. Recentemente, o surgimento de extensões e aplicativos CAD tem permitido o emprego dos Algoritmos Genéticos, dos Fractais, dos CA e de outros sistemas, nos processos investigativos da forma arquitetônica, o que contribuirá para a sua difusão nos próximos anos.

Com relação à última pergunta, sobre as vantagens em se trabalhar com os CA, uma possível resposta é o seu potencial de geração de formas complexas que, atualmente, já podem ser materializadas com relativa facilidade por meio da fabricação digital, podendo resolver questões como a adaptação e a resposta dos edifícios a requisitos funcionais sem a necessidade de padronização. Talvez, a diferença entre o uso dos CA nos dias de hoje e nos anos 1990 resida no fato de que, naquela época, partia-se dos CA (e de outros sistemas oriundos da Inteligência Artificial) buscando-se possíveis aplicações no campo da Arquitetura. Hoje, com o conhecimento produzido por esses pioneiros do Design Computacional, podemos partir de um problema concreto e solucioná-lo com o uso desses sistemas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro proveniente das concessões: 2012/05475-4, 2014/50289-0 e 2015/01228-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

## Referências

- ADILENIDOU, Y. Error as optimization: using cellular automata systems to introduce bias in aggregation models through multigrids. In: ANNUAL CONFERENCE OF EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE, 33., 2015, Viena. **Anais...** Viena: Vienna University of Technology, 2015. p. 601-610.
- ANZALONE, P.; CLARKE, C. Architectural applications of complex adaptive systems. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN ARCHITECTURE, 22., 2003, Indianapolis. **Anais...** Indianapolis: Ball State University, 2003. P. 325-335.

- ARAGHI, S. K. & STOUFFS, R.: 2015. Exploring cellular automata for high density residential building form generation. **Automation in Construction**, v. 49, n. 1, p. 152-162, jan. 2015. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.10.007.
- BALLARD, D. H. **An Introduction to natural computation**. Cambridge: MIT Press, 1999.
- BATTY, M. **Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals**. Cambridge: MIT Press, 2005.
- BAYS, C. Patterns for simple cellular automata in a universe of dense-packed spheres. **Complex Systems**, v. 1, n. 5, p. 853-875, 1987.
- BLITZ, D. **Emergent evolution: qualitative novelty**. Nova Iorque: Springer-Verlag, 2010.
- BRUGGEMAN, F., WESTERHOFF, H. The Nature of the Systems Biology. **Trends in Microbiology**, v. 15, n. 1, p. 45-50, nov. 2007. DOI: 10.1016/j.tim.2006.11.003.
- BURRY, J.; BURRY, M. **The new mathematics of architecture**. Melbourne: Thames & Hudson, 2012.
- CAILLAUD, B. Cellular automata and algorithmic visual creation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENERATIVE ART, 4., 2001, Milão. **Anais...** Milão: Politecnico di Milano, 2001. p. 1-15.
- COATES, P. et al. The use of cellular automata to explore bottom-up architectonic rules. In: EUROGRAPHICS UK ANNUAL CONFERENCE, 14., 1996, Londres. **Anais...** Londres: Imperial College London, 1996. p. 1-14. ISBN: 0-952-1097-3-5.
- CORNING, P. A. The emergence of "emergence": now what? **Emergence: Complexity & Organization**, v. 4, n. 3, p. 54-71, dez. 2002.
- DE CASTRO, L.; VON ZUBEN, F. (Eds.). **Recent developments in biologically inspired computing**. Hershey: Idea Group, 2005.
- DERIX, C.; SIMON, C.; COATES, P. Morphogenetic CA: 69° 40' 33 north. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENERATIVE ART, 6., 2003, Milão. **Anais...** Milão: Politecnico di Milano, 2003. p. 1-18.
- DERRIDA, J. **Edmund Husserl's "origin of geometry": an introduction**. Lincoln: University of Nebraska Press, 1989.
- DEVETAKOVIC, M. et al. Les folies cellulaires: an exploration in architectural design using cellular automata. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENERATIVE ART, 12., 2009, Milão. **Anais...** Milão: Politecnico di Milano, 2001. p. 181-192.
- ERMENTROUT, G. B.; EDELSTEIN-KESHET, L. Cellular automata approaches to biological modeling. **Journal of Theoretical Biology**, v. 160, n. 1, p. 97-133, jan. 1993. DOI: 10.1006/jtbi.1993.1007.
- FISCHER, T.; FISCHER, T.; CECCATO, C. Distributed agents for morphologic and behavioral expression in cellular design systems. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE, 21., 2002, Pomona. **Anais...** Pomona: Cal Poly, 2002. p. 111-121.
- FISCHER, T.; HERR, C. Teaching Generative Design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENERATIVE ART, 4., 2001, Milão. **Anais...** Milão: Politecnico di Milano, 2001. p. 1-14.

- FLAKE, G. W. **The computational beauty of nature**. Cambridge: MIT Press, 2000.
- FRAZER, J. H. **An evolutionary architecture**. Londres: Architectural Association, 1995.
- GARDNER, M. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". **Scientific American**, v. 223, n. 4, p. 120-123, out. 1970.
- GORDON, D. **Ants at work: how an insect society is organized**. Nova Iorque: The Free Press, 1999.
- HABRAKEN, N. et al. **Variations: the systematic design of supports**. Cambridge: The MIT Press, 1976.
- HERR, C.; FISCHER, T. Using hardware cellular automata to simulate use in adaptive architecture. In: CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA, 9., 2004, Seul. **Anais...** Seul: Yonsei University, 2004. p. 815-828.
- HERR, C.; KVAN, T. Adapting cellular automata to support the architectural design process. **Automation in Construction**, v. 16, n. 1, p. 61-69, jan. 2007. DOI: 10.1016/j.autcon.2005.10.005.
- HERR, C.; KVAN, T. Using cellular automata to generate high-density building form. INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN FUTURES, 11., 2005, Viena. **Anais...** Viena: Vienna University of Technology, 2005. p. 249-258.
- HOLLAND, J. Universal spaces: a basis for studies in adaptation. In: CAIANIELLO, E. R. **Automata Theory**. Nova Iorque: Academic Press, 1966. p. 218-230.
- HOLLAND, J. H. Studying complex adaptive systems. **Journal of Systems Science & Complexity**, v. 19, n. 1, p. 1-8, mar. 2006. DOI: 10.1007/s11424-006-0001-z.
- HOLMAN, P. **Engaging emergence: turning upheaval into opportunity**. São Francisco: Berrett-Koehler, 2010.
- ILACHINSKI, A. **Cellular automata: a discrete universe**. Nova Jersey: World Scientific, 2001.
- JENCKS, C. **Architecture of the jumping universe, a polemic: how complexity science is changing architecture and culture**. Londres: Academic Editions, 1997.
- JOHNSON, S. **Emergência: a dinâmica de rede em formigas, cérebros e cidades**. Rio de Janeiro: Zahar, 2003.
- KARAKIEWICZ, J.; BURRY, M.; KVAN, T. The next city and complex adaptive systems. In: CELANI, G.; SPERLING, D.; FRANCO, J. (Eds.) **Computer-Aided Architectural Design Futures, the next city: new technologies and future of the built environment, selected papers**. São Paulo: Springer, 2015.
- KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. Oxon: Taylor & Francis Group, 2003.
- KRAWCZYK, R. Architectural interpretation of cellular automata. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENERATIVE ART, 4., 2001, Milão. **Anais...** Milão: Politecnico di Milano, 2001. p. 71-78.
- KUHN, T. S. **The structure of the science revolution**. 2. ed. Chicago: The University of Chicago, 1962.

LANGTON, C. G. **Studying artificial life with cellular automata**. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, v. 22, n. 1-3, p. 20-149, nov. 1986.

LINDENMAYER, A. Mathematical models for cellular interaction in development. **Journal of Theoretical Biology**, v. 18, n.1, p. 280-315, 1968.

LYNN, G. **Folds, bodies and blobs: Collected essays**. Paris: La Lettre volée, 1998.

MITCHELL, M. **Complexity: a guide tour**. Oxford: Oxford University Press, 2011.

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

MVS ARCHITECTS. **Company profile**. Ilustração Paul Minifie e Jan van Schaik. Melbourne: MvS Architects, 2016. 7 p., il. color.

POLIDORI, M.; KRAFTA, R. **Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais**. *Geofocus*, v. 5, p. 156-179, 2005.

SAKIEH, Y. et al. Simulating urban expansion and scenario prediction using a cellular automata growth model, SLEUTH, through a case study of Karaj City, Iran. **Journal of House and Built Environment**. v. 30, n. 4, p. 591-611, nov. 2015. DOI: 10.1007/s10901-014-9432-3.

SAYED, M. et al. In: **Sucher punch, cellular automata: evaluating the edge of chaos**. Disponível em: <<http://www.suckerpunchdaily.com/>> Acesso em: 22 jan. 2014.

SCHIFF, J. L. **Cellular automata: a discrete view of the world**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

SCHRANDT, R.; ULAM, S. On recursively defined geometrical objects and patterns of growth. In: BURKS, A. **Essays on Cellular Automata**. Urbana: University of Illinois Press, 1970. p. 232-243.

SILVER, S. A. In: **The lexicon life, the glider gun**. Disponível em: <<http://www.argentum.freeseerve.co.uk/>> Acesso em: 12 dez. 2013.

TESTA, P. et al. MoSS - morphogenetic surface structure: a software tool for design exploration. In: GREENWICH CREATIVE DESIGN SYMPOSIUM, 2000, Londres. **Anais...** Londres: University of Greenwich, 2000. p. 1-11.

VON NEUMANN, J.; BURKS, A. W. **Theory of self-reproducing automata**. Urbana: University of Illinois Press, 1966.

WEAVER, W. Science and complexity (1948). **Emergence: Complexity and Organization**, v. 6, n. 3, p. 65-74. Republishing in sep. 2004.

WEISSTEIN, E. W. In: **Eric Weisstein's home page, life forms**. Disponível em: <<http://www.ericweisstein.com/>> Acesso em: 26 out. 2013.

WOLFRAM, S. **A new kind of science**. Champaign: Wolfram Media, 2002.

WOLFRAM, S. **Theory and application of cellular automata**. Reading: Addison-Wesley, 1986.

**DATA DE SUBMISSÃO DO ARTIGO: 03/01/2017 APROVAÇÃO: 14/09/2017**

#### **RESPONSABILIDADE INDIVIDUAL E DIREITOS AUTORAIS**

A responsabilidade da correção normativa e gramatical do texto é de inteira responsabilidade do autor. As opiniões pessoais emitidas pelos autores dos artigos são de sua exclusiva responsabilidade, tendo cabido aos pareceristas julgar o mérito e a qualidade das temáticas abordadas. Todos os artigos possuem imagens cujos direitos de publicidade e veiculação estão sob responsabilidade de gerência do autor, salvaguardado o direito de veiculação de imagens públicas com mais de 70 anos de divulgação, isentas de reivindicação de direitos de acordo com art. 44 da Lei do Direito Autoral/1998: “O prazo de proteção aos direitos patrimoniais sobre obras audiovisuais e fotográficas será de setenta anos, a contar de 1º de janeiro do ano subsequente ao de sua divulgação”.

O CADERNOS PROARQ (issn 1679-7604) é um periódico científico sem fins lucrativos que tem o objetivo de contribuir com a construção do conhecimento nas áreas de Arquitetura e Urbanismo e afins, constituindo-se uma fonte de pesquisa acadêmica. Por não serem vendidos e permanecerem disponíveis de forma *online* a todos os pesquisadores interessados, os artigos devem ser sempre referenciados adequadamente, de modo a não infringir com a Lei de Direitos Autorais.