

Marcia Luciana Aguenta Castro
Faculdade Anhanguera de Limeira
marcia.aguena@unianhanguera.edu.br

Reinaldo de Oliveira Castro
Centro Universitário Anhanguera
unidade Leme
reinaldo@ufscar.br

Anhanguera Educacional S.A.

Correspondência/Contato
Alameda Maria Tereza, 2000
Valinhos, São Paulo
CEP. 13.278-181
rc.ipade@unianhanguera.edu.br

Coordenação
Instituto de Pesquisas Aplicadas e
Desenvolvimento Educacional - IPADE

Informe Técnico
Recebido em: 14/7/2008
Avaliado em: 16/10/2008

Publicação: 8 de dezembro de 2008

AUTÔMATOS CELULARES: IMPLEMENTAÇÕES DE VON NEUMANN, CONWAY E WOLFRAM

***Cellular automata's: von Neumann, Conway and
Wolfram's implementations***

RESUMO

Os autômatos celulares são ferramentas que podem representar quase todos os sistemas evolutivos que se pode imaginar. Suas principais características são a computação descentralizada, onde cada célula é capaz de computar sua evolução apenas baseando-se nos estados anteriores do sistema de células, e a simplicidade de suas regras, que, no entanto dificilmente podem ter suas consequências previstas. Atualmente pesquisadores de vários diferentes campos utilizam modelos de autômatos celulares para simular diferentes tipos de aplicações na biologia evolutiva, na dinâmica das reações químicas, nos sistemas dinâmicos da física, no comportamento de mercados e muitas outras. Todas as aplicações hoje existentes são de alguma forma baseadas nos trabalhos de John von Neumann, John Holton Conway e Stephen Wolfram, cujas implementações serão abordadas neste trabalho.

Palavras-Chave: Autômatos celulares, jogo da vida, Princípio da Equivalência Computacional.

ABSTRACT

The Cellular Automata are tools that can represent almost all of evolutive systems that we can imagine. The main characteristics of a CA are the decentralized computing model, where each cell is able to compute its own evolution just based on previous state of the system and the simplicity of its rules that however hardly may have its consequences predicted. Nowadays researches from many different areas use Cellular Automata to simulate different kinds of applications in evolutive biology, in chemical reactions dynamics, in dynamics physics systems, in market behavior and many others. Every applications seemed today are somehow based on John von Neumann's, John Holton Conway's and Stephen Wolfram's work, witch implementations will be studied in this paper.

Keywords: Cellular automata, game of life, Computational Equivalence Principle.

1. INTRODUÇÃO

Os autômatos celulares são ferramentas simples e poderosas para representar sistemas físicos compostos por elementos discretos com interações locais. Vários sistemas se enquadram nessa definição, tais como o processo de surgimento de um cristal de gelo, em que cada molécula traz suas próprias informações locais e agrupam-se baseadas nas construções das moléculas vizinhas (REITE, 2005), ou certo conjunto de moléculas durante uma reação química. Na biologia, a dinâmica da reprodução do DNA pode ser entendida também como um autômato celular. (CARDOZO, 2006) empregou autômatos celulares para representar a dinâmica de populações de um determinado tipo de cigarras (gênero *Magicicada*). (CALIDONA et al., 2001) da mesma forma empregou tais características para simular deslizamentos de terra. A característica comum de todos estes trabalhos é a representação de sistemas evolutivos que a partir de uma configuração inicial aleatória, cada componente do sistema tem sua evolução baseada na situação atual de seus vizinhos e num conjunto de regras que são iguais para todos os componentes. Embora as regras sejam as mesmas para todos os componentes do sistema, a situação dos componentes vizinhos pode variar indefinida e complexamente durante o tempo, podendo originar novos sistemas e chegando até a sua auto-reprodução.

Von Neumann estava interessado em encontrar um tipo de organização lógica suficiente para um autômato controlar a si próprio de tal maneira que pudesse também se reproduzir. A primeira solução foi a utilização de um sistema autômato cinemático¹, porém o modelo era limitado. O trabalho do matemático Ulam trouxe a perspectiva de que se uma auto-reprodução pode ser descrita como uma seqüência lógica de passos, isto é um algoritmo, então há uma Máquina de Turing capaz de perfazer sua própria reprodução (LANGTON, 1986).

A solução a questão foi apresentada em um manuscrito inacabado devido a morte de von Neumann em 1957, segundo (AGUIAR et al., 2004), o manuscrito foi editado e completado por Burks (NEUMANN, 1966) e trazia um autômato celular semelhante a uma Máquina de Turing capaz entre outras coisas de se auto-reproduzir.

Durante a década de 60, estabeleceu-se uma relação entre os autômatos celulares e os computadores paralelos, dada a característica de descentralização da computação envolvida nesses sistemas. Na década de 70, com o advento da tecnologia VLSI²,

¹ Segundo o dicionário Michaelis, Cinemática é a ciência que estuda os movimentos dos corpos, independentemente das forças que os produzem.

² VLSI - Very-large-scale integration pastilhas que podem atingir mais de 100 mil componentes. (Stallings, 2002).

foi possível a construção de vetores unidimensionais de grandes dimensões com processamento intercomunicado de elementos. Com a tecnologia SIMD³ que suporta paralelismos de grande escala e conexões locais as simulações de autômatos celulares tornaram-se mais facilmente implementáveis (SIGNORINI, 1989).

Em 1970, o matemático John Holton Conway criou o “Jogo da Vida”, um autômato celular que simulava alterações em populações de seres vivos baseados em regras locais simples. Neste autômato celular, cada célula nasce ou morre de acordo com as células vizinhas e o jogo tende a morte de todas as células ou a geração de padrões estáveis. Segundo (NEVES, 2003), embora o sistema seja baseado em regras simples, os resultados visuais obtidos são complexos e imprevisíveis e pequenas alterações nas condições iniciais do sistema podem gerar grandes mudanças de comportamento.

Em 1982, Stephen Wolfram (WOLFRAM, 1982) estudou sistematicamente a mecânica estatística do funcionamento dos autômatos celulares e a formação de padrões particularmente similares. A complexidade de seus resultados o levou a conclusão de que ele poderia ser utilizado como modelo matemático de sistemas físicos, biológicos e computacionais. Mais tarde em (WOLFRAM, 1983), apresentou os primeiros passos na investigação de autômatos celulares como modelos matemáticos para sistemas estatísticos auto-organizados. Nesse artigo, foram analisados detalhadamente os autômatos celulares simples envolvendo seqüências de células em uma linha com valores binários. Ao longo do tempo (discreto) uma nova linha era criada e cada célula tinha seu valor baseado nos valores das células vizinhas na linha anterior. Durante a década de 80, o autor ainda apresentou vários outros artigos estudando as propriedades algébricas dos autômatos (WOLFRAM, 1984), problemas não resolvidos (WOLFRAM, 1985) e outros aspectos. Em 2002, publicou em (WOLFRAM,2002) o resultado de seus vinte anos de pesquisa em um trabalho único, conciso e coerente com diversos exemplos de como sua conjectura inicial pode ser comprovada.

A seção 2 deste trabalho trata das definições informal e formal do que vem a ser um autômato celular. Nas seções seguintes, são abordadas as implementações historicamente mais importantes: na seção 3 o autômato celular de von Neumann, na seção 4 o autômato celular de Conway e na seção 5 o autômato celular de Wolfram. A seção 6 traz as conclusões deste trabalho.

³ SIMD – Single Instruction Multiple Data – “Uma única instrução de máquina controla a execução simultânea de certo número de elementos em passos de execução. Cada elemento de processamento tem uma memória de dados a ele associada, de modo que cada instrução é executada sobre um conjunto de dados diferente em cada processador. Os processadores vetoriais e matriciais pertencem a essa categoria.” (Stallings, 2002).

2. DEFINIÇÃO DE UM AUTÔMATO CELULAR

2.1. Definição informal

Segundo (WEIMAR, 1996) um autômato celular é caracterizado pelas propriedades fundamentais:

- Consistem em uma matriz ou grade⁴ de células ;
- A evolução se dá em passos discretos de tempo;
- Cada célula é caracterizada por um estado pertencente a um conjunto finito de estados;
- Cada célula evolui de acordo com as mesmas regras que dependem somente do estado em que a célula se encontra e de um número finito de vizinhos;
- A relação com a vizinhança é local e uniforme.

Um exemplo simples a ser considerado é o modelo Greenber-Hasting, um autômato celular que modela uma excitação média. Uma situação exemplo de excitação média são os tecidos nervosos ou musculares (coração), que podem estar três diferentes estados: descansando, excitado ou em recuperação. Esse modelo pode ser representado por um autômato celular com três estados: (0) descanso, (1) excitado e (2) recuperando. A evolução de uma célula pode ser caracterizada pelas seguintes regras:

- Uma célula em descanso (estado 0) permanece descansando até que alguma vizinha entre no estado excitado (estado 2), nesse caso a célula entra também no estado excitado;
- Uma célula em excitação entra em recuperação (estado 1) no próximo passo;
- Uma célula em recuperação entra em descanso (estado 0) no próximo passo.

Em resumo teremos:

$$0 \rightarrow \begin{cases} 0_se_nenhum_vizinho = 2 \\ 2_se_algum_vizinho = 2 \end{cases}$$

$$2 \rightarrow 1;$$

$$1 \rightarrow 0;$$

Para a relação de vizinhança será utilizada uma vizinhança das quatro células ortogonais. A Figura 1 a seguir resume a transição de cada célula:

⁴ Tradução livre do inglês *lattice*. Em inglês também é citado o termo *grid*, e em português também há a tradução como reticulado.

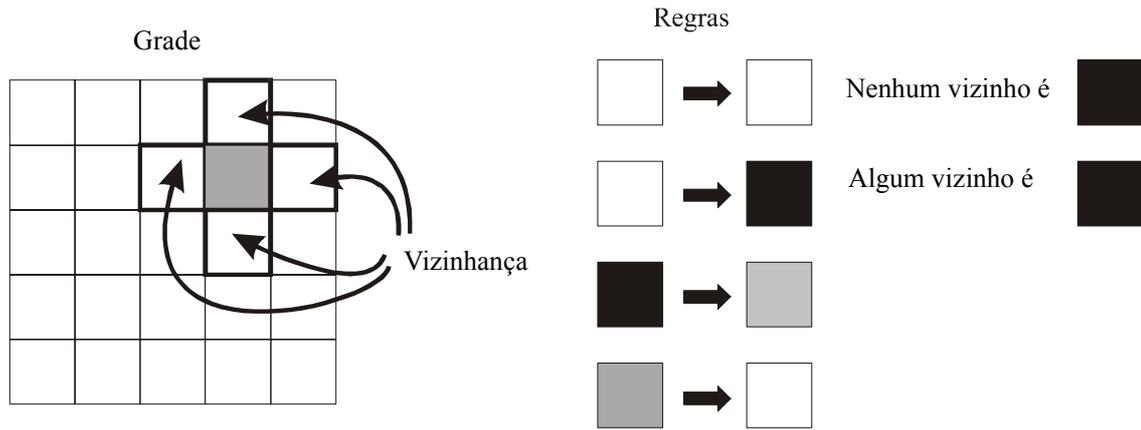


Figura 1. Modelo Greenber-Hasting.

A evolução do autômato depende da condição inicial. Na Figura 2 é mostrado um exemplo com todas as células inicialmente no estado 0 e apenas uma no estado 2.

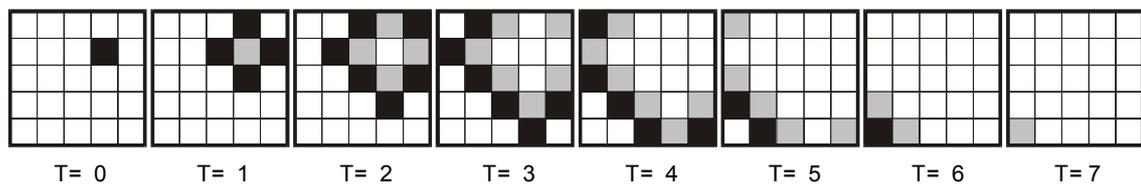


Figura 2. Evolução do autômato de Greenber-Hasting durante o tempo.

2.2. Definição formal

Ainda segundo (WEIMAR, 1996), sejam:

- \mathcal{L} uma grade regular (os elementos de \mathcal{L} são chamados de células),
- \mathcal{S} um conjunto finito de estados,
- \mathcal{N} um conjunto finito, (de tamanho $n = |\mathcal{N}|$) de vizinhança, tal que $\forall c \in \mathbf{N}, \forall r \in \mathbf{L} : r + c \in \mathbf{L}$,
- $f: \mathcal{S}^n \rightarrow \mathcal{S}$ uma função de transição.

A quádrupla $(\mathcal{L}, \mathcal{S}, \mathcal{N}, f)$ é dita um autômato celular.

Para simplificação, definimos uma grade regular como sendo um “ladrilho” de dimensão especial d , isto é, as células unidas preenchem o espaço de dimensão d totalmente e a grade pode ser transladada em d direções independentes e obteremos a mesma grade. Uma configuração $C_t: \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{S}$ é uma função que associa um estado com uma célula na grade. O efeito da função de transição f é trocar a configuração C_t por uma nova configuração C_{t+1} dada pela função:

$$C_{t+1}(r) = f(\{ C_t(i) \mid i \in \mathcal{N}(r) \}),$$

onde denotaremos $\mathcal{N}(r)$ o conjunto de células vizinhas de r , tal que:

$$\mathcal{N}(r) = \{i \in \mathcal{L} \mid r - i \in \mathcal{N}\}$$

Na prática a grade tem um tamanho finito e pode ser transladada em qualquer uma das n -dimensões em que está disposta.

3. O AUTÔMATO DE JOHN VON NEUMANN

Segundo (AGUIAR et al., 2004), o autômato formulado por von Neumann em (NEUMANN, 1966), recebeu a denominação de M_C e tinha como base um espaço celular bidimensional, considerado infinito, onde cada célula se ligava a seus vizinhos ortogonais como representado na Figura 3. Cada célula desse espaço possuía 29 estados distintos (representado por cores) e vizinhanças de 5 células (a célula corrente, seus vizinhos horizontais e verticais⁵).

A Figura 4 representa o esquema em alto-nível do processo no qual o autômato-reprodutor M_C trabalha. M_C possui uma configuração de estados que podem ser agrupados em duas unidades funcionais: a unidade de construção e a unidade de fita.

⁵ Essa vizinhança formada pela célula e seus vizinhos ortogonais também é chamada de vizinhança de von Neumann.

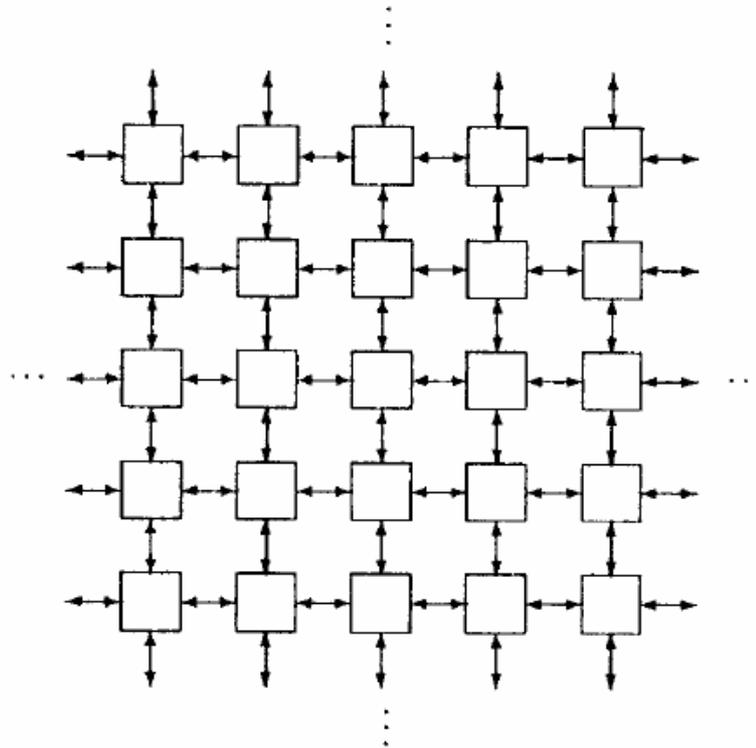


Figura 3. Espaço celular bidimensional com vizinhança ortogonal utilizado pelo autômato de von Neumann (SARKAR, 2000).

Como em uma Máquina de Turing, a unidade da fita possui uma fita representada por um vetor linear de células que contem a informação sobre o autômato a ser construído (M). As informações da fita contêm da esquerda para a direita:

1. As coordenadas x e y (x_0 e y_0) do canto esquerdo inferior do retângulo da área de construção;
2. A largura α e a altura β do retângulo;
3. As células que formarão o autômato (listadas na ordem inversa na qual eles serão colocados no retângulo);
4. O símbolo de fim da fita.

A unidade de construção consiste em um controle de construção e um braço construtor. O braço construtor é um vetor de células que propagam os sinais da unidade de controle com as informações das células a serem construídas de maneira semelhante ao modelo Greenber-Hasting mostrado na seção 2.1, porém canalizada na área do braço. Essa propagação de sinais pode fazer com que o braço se expanda ou contraia (o que nada mais é do que mais ou menos células “ativas” no braço).

O M_C é ativado por um sinal externo enviado ao controle de construção, que por sua vez envia um comando ao controle da fita para que ele leia e envie uma informação da fita. As informações lidas da fita são levadas pelo braço construtor até a área de construção. Quando a leitura da fita chega ao fim (é lido o símbolo de fim da fita), o

braço se recolhe para o canto inferior esquerdo de M e envia um sinal para a inicialização de M. Este procedimento faz M iniciar seu funcionamento, que pode incluir iniciar o processo de auto-reprodução novamente e então o braço construtor volta para sua posição inicial.

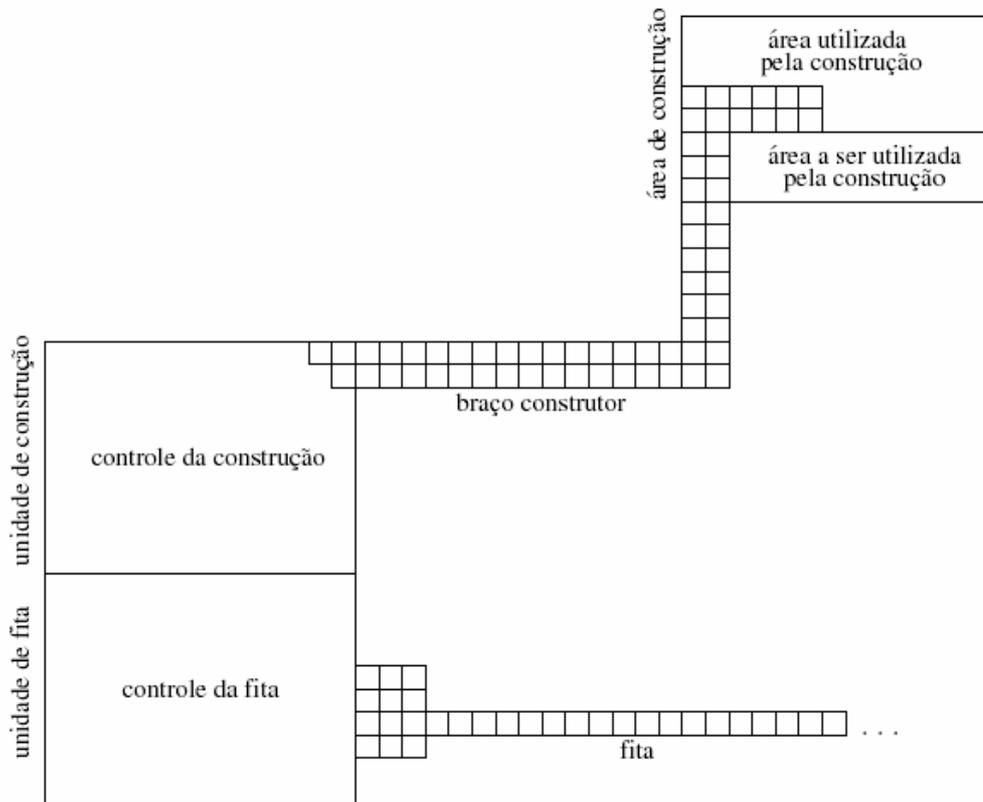


Figura 4. Esquema em alto-nível dos componentes do autômato de von Neumann (AGUIAR et al.,2004).

As funções de alto-nível, tais como ler a fita, enviar ou reconhecer sinais e outras, são totalmente construídas a partir de operações primitivas dos autômatos celulares. Em um nível mais baixo são utilizadas operações primitivas de autômatos celulares para sintetizar as operações lógicas (tais como E e OU) e operações de propagação de sinais ou atrasos.

Podemos perceber que o modelo formulado era um autômato computador-construtor universal, pois possuía duas características marcantes: como uma Máquina de Turing ele poderia computar qualquer algoritmo e também construir um novo autômato em qualquer espaço celular vazio, podendo inclusive construir uma cópia de si próprio.

É interessante verificar a semelhança deste autômato celular com a arquitetura de von Neumann utilizada em todos os computadores atuais, constituída basicamente

de memória (fita), unidade de controle e dispositivos de entrada e saída (sinal de início do autômato).

4. O “JOGO DA VIDA”

Neste Autômato Celular, a vizinhança considerada são as oito células que perfazem um quadrado de vizinhança. O estado de uma célula é representado pelos valores binários (0) se a célula está morta ou (1) se ela está viva. As regras do jogo são:

1. Uma célula viva com 2 ou 3 vizinhos vivos, permanece viva ;
2. Uma célula viva com apenas 1 ou 0 vizinhos vivos, morre (solidão);
3. Uma célula viva com 4 ou mais vizinhos, morre (sufocada);
4. Uma célula morta com exatamente 3 vizinhos vivos, renasce.

Ilustrando as regras, temos a Figura 1 que mostra várias grades ao decorrer do tempo. Os números na figura não fazem parte do jogo e são apenas para exemplificar qual regra do jogo foi aplicada para que ocorresse tal transição:

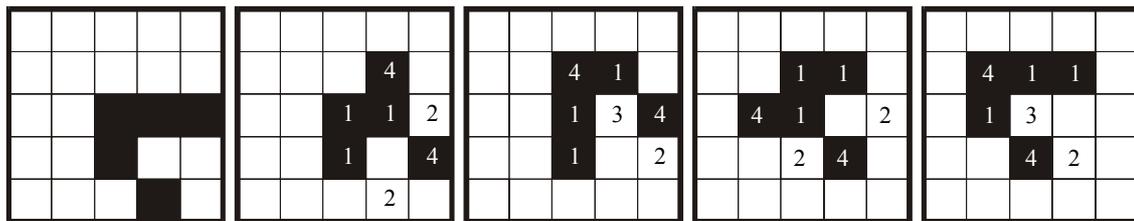


Figura 5. Exemplo de transição do "jogo da vida". Os números representam a aplicação das regras e os quadros a evolução a longo do tempo.

As regras foram criadas para satisfazer as seguintes premissas:

1. Não deve haver nenhuma prova trivial de que qualquer configuração inicial possa crescer ilimitadamente;
2. Deve haver configurações iniciais que aparentemente cresçam sem limites;
3. Deve haver configurações iniciais que no decorrer do tempo cheguem a um resultado que pode ser:
 - a. Sumir completamente (seguindo as regras do jogo, ou por solidão ou sufocamento);
 - b. Assumir uma configuração estável;
 - c. Entrar em ciclo por dois ou mais períodos de tempo;

Em vários testes foram observadas configurações iniciais com comportamento semelhantes e foram classificadas da seguinte forma:

Objetos estáveis: tendem a não sofrer modificações ao longo do tempo. Dentre eles destacam-se as configurações *block*, *beehive*, *boat*, *loaf* e *ship* (Figura 6) (CALLAHAN, 2005).

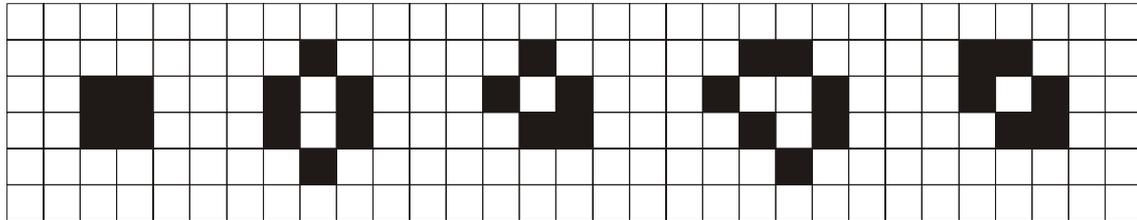


Figura 6. Configurações iniciais estáveis, da esquerda para a direita: *block*, *beehive*, *boat*, *loaf* e *ship*.

Objetos oscilatórios: são configurações iniciais que dado um determinado período de tempo voltam a suas formas originais, tais como as formas chamadas de *blinker* (Figura 7) e *Toad* (Figura 8).

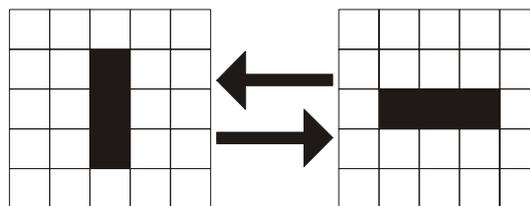


Figura 7. *Blinker*, configuração que oscila entre três células vivas em linha horizontal e vertical.

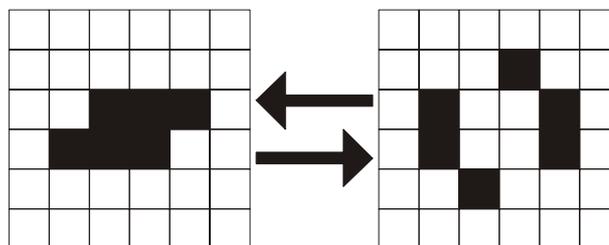


Figura 8. *Toad*, configuração que oscila entre as duas formas diferentes.

Objetos que se movem através da grade: são configurações que ciclicamente repetem suas formas, porém em posições diferentes na grade e algumas vezes rotacionadas. O exemplo da Figura 5 é um objeto chamado *glider* que, como podemos observar volta à mesma forma a cada dois passos, porém rotacionado e assim leva suas células vivas em uma trajetória diagonal (repete-se uma célula a esquerda e uma para cima depois de 4 períodos de tempo).

A interação dos objetos pode produzir efeitos diversos. Com *gliders* e blocos pode-se simular contadores, portas lógicas AND, OR e NOT. É possível construir um autômato de estados finitos conectado a contadores, o que possui o mesmo poder

computacional de uma Máquina de Turing. Além disso, é possível criar configurações que constroem novos objetos, inclusive cópias da configuração original. Por essa razão pode-se dizer que o Jogo da Vida é um autômato celular que é tanto uma máquina quanto um construtor universal.

5. AUTÔMATO CELULAR DE WOLFRAM

Wolfram estudou autômatos celulares que partindo de uma linha inicial de células, evolui em passos discretos de tempo criando novas linhas consecutivamente abaixo da anterior. Um exemplo simples da evolução de tais autômatos em (WOLFRAM, 1983) é um conjunto de linhas com células de valores 0 ou 1. Tomemos o valor da célula na posição i e no tempo t sendo $a_i^{(t)}$ e uma regra de evolução simples como:

$$a_i^{(t+1)} = (a_{i-1}^{(t)} + a_{i+1}^{(t)}) \bmod 2$$



Figura 9. Conjunto de células de uma configuração inicial do autômato celular o valor 0 é representado por uma célula branca, o valor 1 por uma célula preta. (WOLFRAM, 1983).

O resultado do exemplo anterior no decorrer do tempo é a Figura 10:

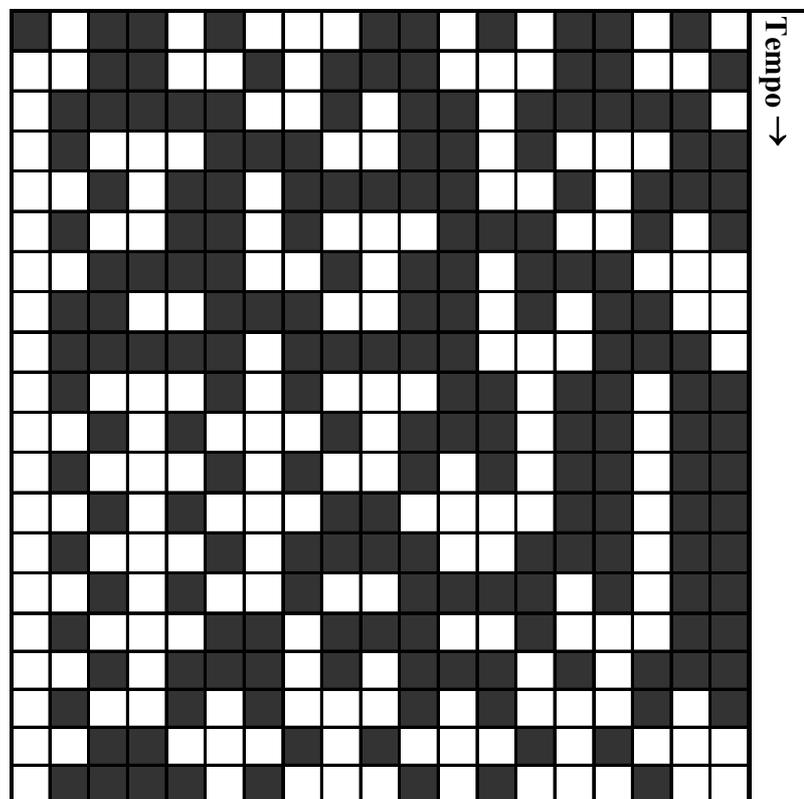


Figura 10. Evolução de autômato celular de Wolfram.

Porém se consideramos uma configuração inicial com apenas uma “semente”, ou seja, apenas uma célula com valor 1 e todas as outras com valor 0, teremos a Figura 11 que pode ser considerada um fractal:

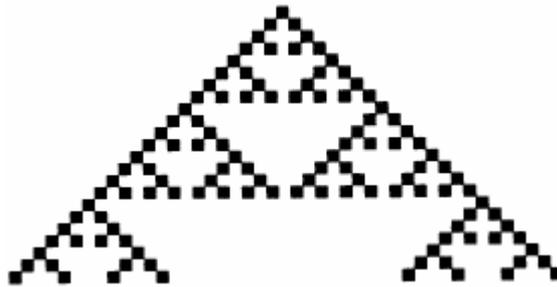


Figura 11. Resultado do autômato celular de Wolfram com apenas uma semente (WOLFRAM, 1983).

O padrão obtido pela Figura 11 também pode representar um Triângulo de Pascal de coeficientes binomiais reduzidos a módulo de 2. A Figura 12 mostra a evolução de um estado inicial desordenado, com uma configuração inicial de sementes escolhidas aleatoriamente:

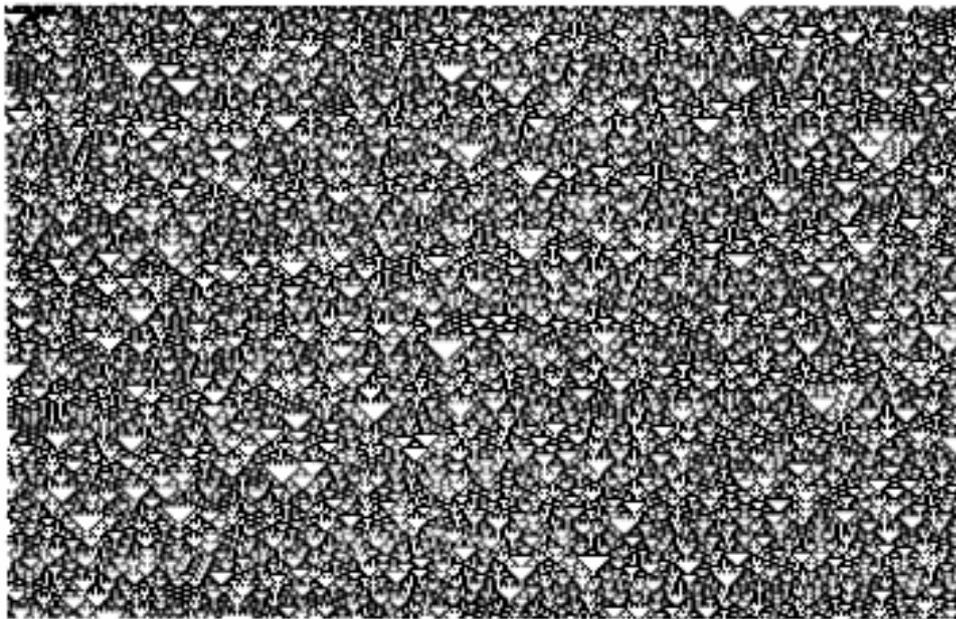


Figura 12. Evolução do autômato celular com uma configuração inicial aleatoriamente escolhida (WOLFRAM, 1983).

Podemos observar na formação da Figura 11 e Figura 12 a formação de triângulos “limpos”. O aparecimento espontâneo dessas áreas é um exemplo simples de auto-organização⁶ do autômato. O padrão da Figura 12 lembra fortemente o padrão de pigmentação achado em algumas conchas de moluscos. É bem possível que a pigmentação de tais moluscos sigam as mesmas regras deste autômato celular.

⁶ Tradução livre do inglês *self-organization*.

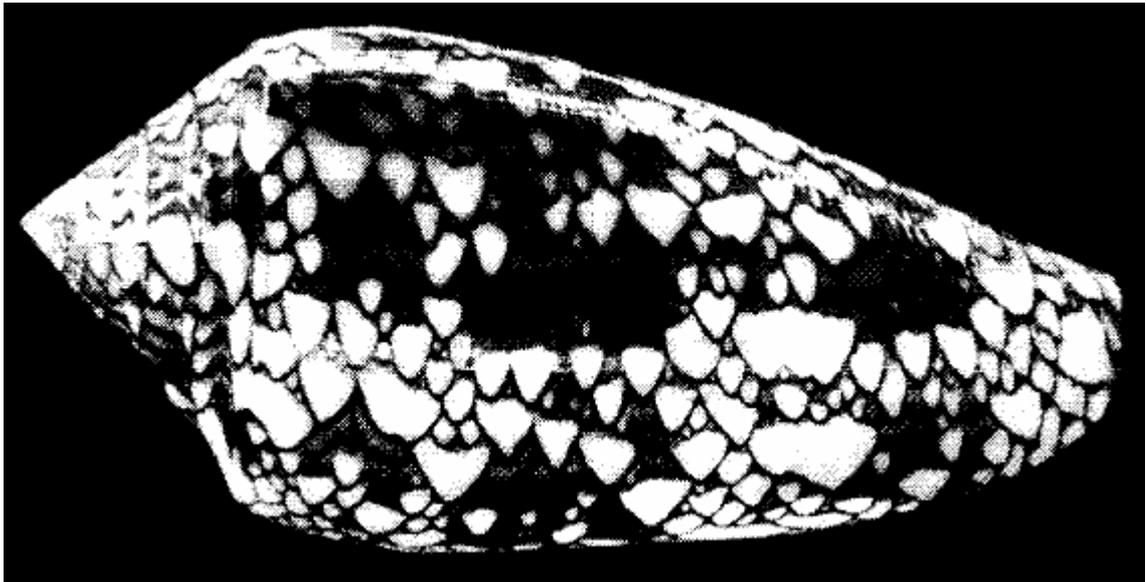


Figura 13. Concha de molusco cujo padrão assemelha-se ao gerado pelo autômato celular de Wolfram (WOLFRAM 1983).

5.1. Comportamento e Classificação de Autômatos Celulares

Enquanto a maioria dos sistemas termodinâmicos tendem a degradação (máxima entropia⁷) uma grande parte dos sistemas biológicos tendem a se estruturar com o tempo, mesmo tendo iniciado com estado de desordem e desestruturação. Um exemplo disto é regeneração ou extinção de espécies em um habitat natural depois da intervenção do homem ou o estado de equilíbrio do sistema imunológico após uma infecção. Estudando a estatística das ocorrências de uma configuração de estados em um autômato com um número finito de células (n), Wolfram pode observar que embora as possíveis configurações que poderiam ser obtidas (2^n já que cada célula só tem 2 estados) só pudessem derivar uma única nova configuração, a mesma configuração poderia ter sido derivada de várias outras (como uma função não injetora). Isto significa não só que durante a evolução, a informação da trajetória seguida é perdida, tornando impossível calcular seu caminho de volta (irreversível), mas principalmente implicando que, dado uma configuração inicial aleatória é esperado que algumas configurações terão maiores e outras menores probabilidade de ocorrer.

Após um dado período de tempo, as configurações com maior probabilidade de ocorrer são chamadas de atratores da evolução de um autômato celular. Conclui-se que se este atrator tem características organizadas, elas aparecerão espontaneamente durante a evolução de um autômato.

⁷ Entropia, na melhor definição do dicionário Houaiss é a medida da variação ou desordem em um sistema.

Em estudos exaustivos, verificou-se que embora a escolha da função de transição diferisse em detalhes, todos os padrões tendem a cair em 4 classe qualitativas. Seguindo as medidas de entropia desses resultados, Wolfram propôs uma classificação empírica:

Classe 1 – Autômatos cuja evolução temporal leva a um estado homogêneo no qual todas as células atingem um mesmo valor (Figura 14.a);

Classe 2 – Autômatos cuja evolução temporal leva a um estado periódico no tempo e espacialmente não homogêneo onde nem todas as células possuem o mesmo valor (Figura 14.b);

Classe 3 – Autômatos que levam a um padrão caótico, desordenado evoluindo para um padrão não reconhecível (Figura 14.c);

Classe 4 – Autômatos cuja evolução leva a estruturas localizadas complexas com evolução imprevisível, que pode ser propagar, criar e/ou destruir outras estruturas e algumas vezes perdurar por longo tempo (Figura 14.d);

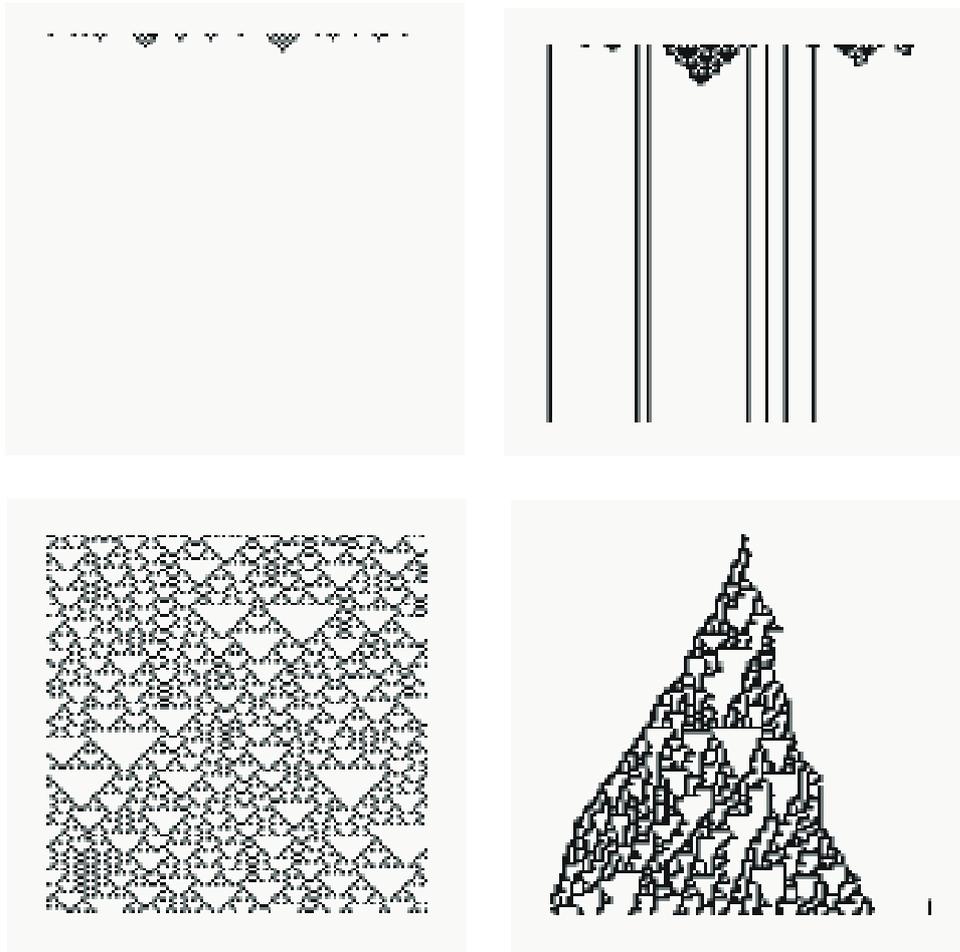


Figura 14. Padrões espaço-temporais característicos, típicos em cada uma das quatro classes de Wolfram (da esquerda para a direita, de cima para baixo):
 (a) Classe 1, (b) Classe 2, (c) Classe 3 e (d) Classe 4 (AGUIAR et al., 2004).

A existência de somente quatro classes de padrões implica na universalidade da evolução dos autômatos celulares e a conclusão de que muitas de suas características dependem somente dessa classificação e não de detalhes menores de sua evolução.

Para melhor analisar as implicações dessa classificação, consideremos a previsibilidade do resultado da evolução do autômato celular, dada uma configuração inicial.

Para a classe 1 a resposta é trivial: independente do estado inicial, o sistema sempre evolui para um estado homogêneo.

Para a classe 2 nota-se que os efeitos de uma célula em particular propaga-se somente a uma distância finita. Assim, a mudança em uma célula afeta somente uma região finita ao seu redor. Decorrente disso temos que a previsão do valor final de uma célula requer somente o conhecimento do conjunto finito de valores iniciais da célula.

Os automatos celulares da classe 2 podem ser utilizados como um filtro que selecionam apenas algumas características do estado inicial. Por essa razão, automatos celulares desta classe são utilizados em processamento de imagens, para filtragem e ou segmentação pois podem selecionar e melhorar um determinado tipo de padrão de pixels.

Na classe 3 as mudanças dos valores iniciais de uma célula se propaga afetando células cada vez mais distantes no decorrer do tempo de forma a que o valor de uma determinada célula em particular, após muitos passos depende de um número cada vez maior de células presentes em gerações anteriores. Dessa forma, a predição de valores de uma célula em tempo infinito requer o conhecimento de um número infinito de valores iniciais.

Já a classe 4, possui uma complexidade de comportamento que sugere sistemas capazes de computação universal. Em uma configuração infinita e desordenada todas as seqüências possíveis de valores de células estão representadas. Pode-se considerar que cada uma dessas seqüências representa um possível programa e assim, com um estado inicial infinito e desordenado, pode-se considerar que um autômato celular de classe 4 executa em paralelo todos os programas possíveis, inclusive, probabilisticamente, em algum lugar dessa linha alguma estrutura auto-reprodutiva.

5.2. O Princípio da Equivalência Universal

Wolfram formulou em (WOLFRAM, 2002) o controverso Princípio da Equivalência Computacional, que liga todos os experimentos e conclusões de suas pesquisas sobre o tema.

A chave unificadora dessa idéia que permite a formulação de tal princípio é simples porém poderosa: todos os processos, sejam eles produzidos pelo esforço humano ou de ocorrência espontânea na natureza podem ser vistos como computações de mesma complexidade.

Com o advento das aplicações de computadores modernos, é possível representar diferentes tipos de dados, números, textos, imagens e praticamente tudo, indicando que é possível pensar em algum processo que segue regras definitivas como sendo computação, a despeito do tipo de elementos envolvidos. Por conseqüência, é razoável pensar em processos da natureza como computações.

Unindo-se a grande variedade de sistemas simulados por autômatos celulares, sua equivalência à uma Máquina de Turing e o poder computacional proporcionado pelos computadores e linguagens de programação modernos, o autor afirma que não há diferença entre o nível de sofisticação computacional alcançada pelos humanos e todas a sorte de outros sistemas na natureza ou qualquer outro, praticamente todos são similares a simples formação de um autômato celular.

6. CONCLUSÕES

Este apresentou um breve histórico da evolução dos autômatos celulares com ênfase nas principais implementações. A primeira delas, a implementação de John von Neumann reflete um pouco da arquitetura de von Neumann dos computadores atuais e foi a primeira a criar um autômato capaz de se reproduzir, ou seja, criar um outro autômato igual a si próprio.

A segunda implementação mostrada, a do matemático Conway chamada “Jogo da Vida” é particularmente interessante por adequar-se a representação de dinâmica populacionais. Algumas configurações também podem representar estruturas computacionais tais como portas lógicas ou uma Máquina de Turing, o que representa uma máquina universal capaz de computar qualquer algoritmo.

A terceira implementação é a base dos experimentos de Wolfram e seus estudos culminam no Princípio da Equivalência Computacional, reforçada pelas outras duas implementações, que afirma que toda complexidade de sistemas evolutivos pode ser representada pela simplicidade de uma autômato celular. Segundo Wolfram este princípio encerra a maiores fraquezas e potencialidades da ciência quando implica que todas as maravilhas podem ser capturadas em regras simples, porém não se pode prever todas as conseqüências de tais regras, apenas podemos observar seus efeitos e ver aonde nos levarão.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. S.; DIMURO, G. P.; COSTA, F. A. **Modelos matemáticos baseados em autômatos celulares para geoprocessamento**. SBMAC. São Carlos, SP, Brasil, 2004, 58 p.
- CALIDONNA, C. R.; DI NAPOLI, C.; GIORDANO M.; FURNARI, M. M.; DI GREGORIO, S. A Network of Cellular Automata for a Landslide Simulation. 15th International Conference on Supercomputing. **Proceedings...** Sorrento, Itália, 2001, p. 419-426.

CALLAHAN, P. **Conway's game of life**. Math.com - The World of Math Online. Disponível em: <<http://www.math.com/students/wonders/life/life.htm>>. Acesso em 8 de julho de 2008.

CARDOZO, G. O. **Dinâmica de populações em autômatos celulares**. 2006, p. 77. Tese (Doutorado em Física) - Instituto de Física de São Carlos - USP, São Carlos, SP.

LANGTON, C. Self-reproduction on a Cellular Automata. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, North-Holland, v.10, n. 1-2, jan. 1986, p. 135-144.

NEVES, R. P. O. **A.L.I.V.E**. Vida artificial em ambientes virtuais: uma plataforma experimental em realidade virtual para estudos dos seres vivos e da dinâmica da vida. 2003, 151 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos) - Politécnica, USP, São Paulo, Brasil.

REITE, C. A. A local cellular model for snow crystal growth. **Chaos, Solitons & Fractals**, Easton - PA, v. 23, n. 4, fev. 2005, p. 1111-1119.

SARKAR, P. A Brief History of Cellular Automata. **ACM Computing Surveys**. New York, NY, USA, v. 32, n. 1, mar. 2000, p. 80-107.

SIGNORINI, J. How a SIMD machine can implement a complex cellular automaton? A case study: von Neumann's 29-state cellular automaton. **Supercomputing '89**: Proceedings of the 1989 ACM/IEEE conference on Supercomputing, ACM. Reno, Nevada, USA, ago. 1989, p. 175-186.

STALLINGS, W. **Arquitetura e organização de computadores**. 5. ed. São Paulo, SP: Prentice-Hall, 2002, 786 p.

VON NEUMANN, J. **The Theory of Self-Reproducing Automata**, A. W. Burks (Ed.), Champaign, IL, USA: University of Illinois Press, 1966, 388 p.

WEIMAR, J. R. **Simulation with cellular automata**. Berlin: Logos Verlag Berlin, 1998, 208 p.

WOLFRAM, S. Cellular automata as simple self-organizing systems. Technical report. **Caltech preprint CALT**. Pasadena California, 1982, p. 68-938.

_____. Statistical mechanics of cellular automata. **Reviews of Modern Physics**. v. 55, I. 3. Melville, NY, USA, jul. 1983, p. 601-644.

_____. Cellular automata. **Los Alamos Science**. n. 9. Los Alamos, Califórnia, outono 1983, p. 2-21.

_____. Twenty problems in the Theory of Cellular Automata. **Physica Scripta**. T. 9, Bristol - Reino Unido, 1985, p.170-183.

_____. **A new King of Science**. Champaign, IL, USA: Wolfram Media Inc., 2002, 1280 p.

WOLFRAM, S.; MARTIN, O.; ODLYZKO, A. M. Algebraic properties of cellular automata, **Communications in Mathematical Physics**. v. 93, n. 2. Heidelberg, Alemanha, jun. 1984, p. 143-284.