



FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

Aula 04 - Autômatos Celulares.

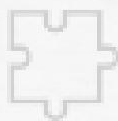
Professor: Douglas Aquino Moreno



GOVERNO DO
TOCANTINS
TRABALHANDO E CUIDANDO DE **TODOS**

01

Autômatos Celulares





Autômatos Celulares



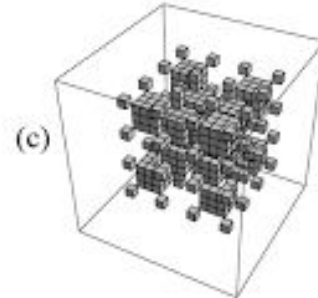
Autômatos Celulares (AC) são modelos matemáticos compostos por grades de células que evoluem ao longo do tempo de acordo com regras simples. Eles são usados para simular sistemas complexos, como ecossistemas, redes neurais e disseminação de epidemias.



(a)



(b)



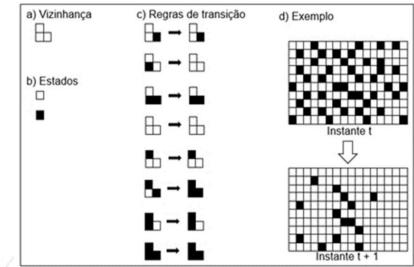
(c)



Autômatos Celulares



- Os autômatos celulares são simulações computacionais que tentam emular a suposta maneira pela qual as leis da natureza funcionam.
- É realmente possível imaginar nosso mundo complexo e às vezes aparentemente aleatório e fascinante sendo criado por um conjunto pequeno de regras relativamente simples?

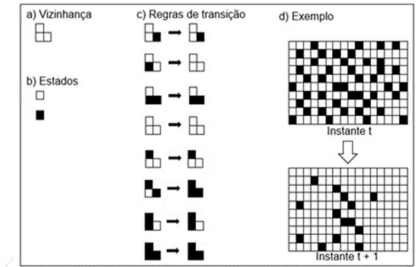




Autômatos Celulares



- Os autômatos celulares podem nunca dar uma resposta definitiva a esse tipo de perguntas, porque eles retratam a natureza de uma maneira grosseira.
- Mas eles podem dar uma ideia razoável de como é um mundo governado por regras simples.

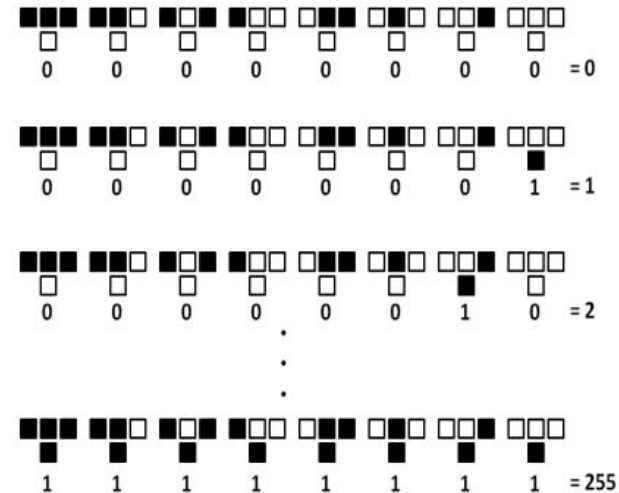


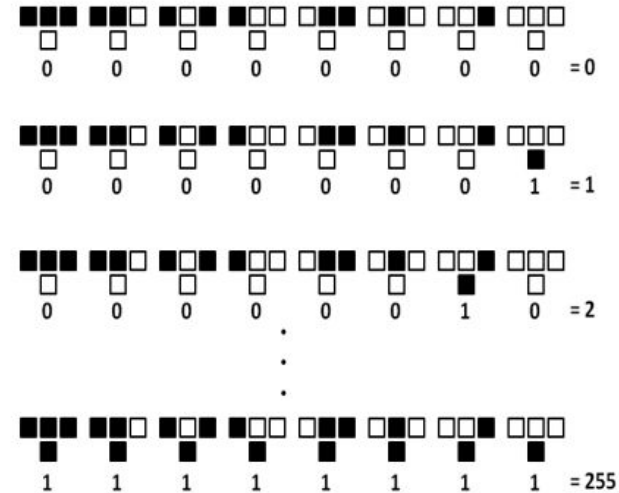
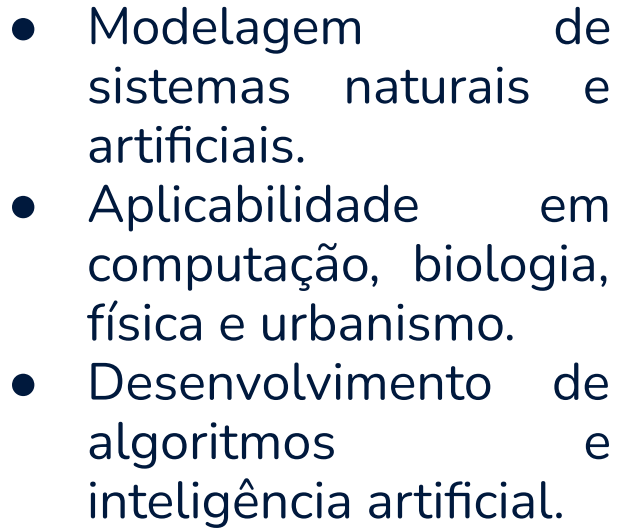


Definição (informal)



Uma automação celular é um sistema dinâmico, onde o tempo e o espaço são discretos.







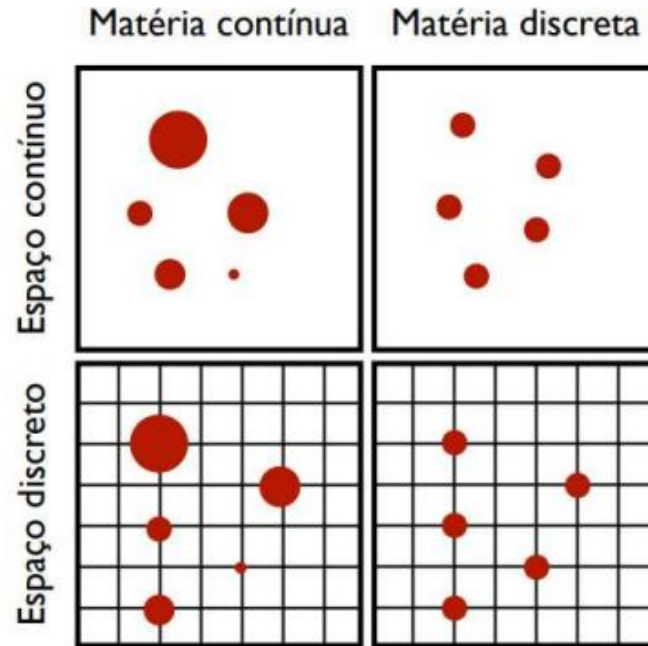
Contexto Histórico



- 1940s: Primeiros estudos de AC por Stanislaw Ulam e John von Neumann no Laboratório Nacional de Los Alamos.
- 1970: John Conway cria o famoso "Game of Life", um modelo de AC que simula o crescimento e evolução de organismos vivos.
- 1980s: Stephen Wolfram populariza o estudo dos autômatos celulares como base para modelos computacionais complexos.



Definição (informal)





Definição (informal)



- **O sistema é dividido em células, seus elementos básicos.**
- Tais células possuem um conjunto finito de estados predefinidos e um conjunto de condições necessárias para a mudança de estados.
- **Os estados das células são alterados conforme um conjunto de regras de transição.**
- Tais regras de transição são baseadas no estado atual da célula e de suas vizinhas.
- **É válido ressaltar que os estados são alterados ao mesmo tempo para todas as células.**
- Por exemplo, o estado da célula c_i no tempo t , depende apenas do seu estado e dos estados das células vizinhas no tempo $t-1$.
- **A vizinhança das células é definida local e uniformemente (se uma célula tem n vizinhos, todas as células terão).**



Exemplo Simples



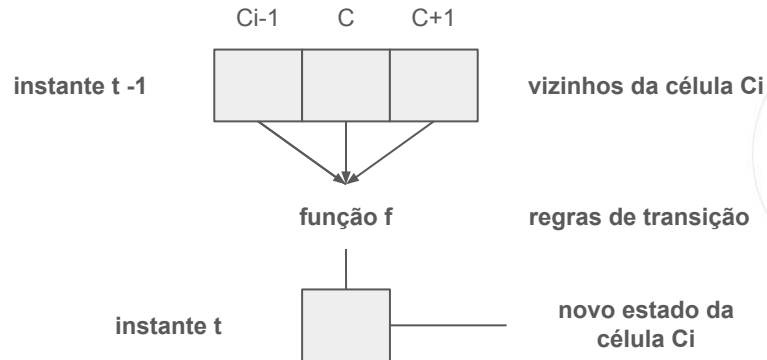
- Um exemplo simples seria a propagação de um pulso numa corda.
- **Dividimos a corda em pequenos pedaços, que chamaremos de células.**
- Temos que para uma célula sofrer alteração no seu estado, ou seja, para um pulso ser propagado, é preciso que algum de seus vizinhos seja alterado (ou estimulado) no tempo anterior.
- **Definimos os vizinhos de cada célula como as mais imediatamente à direita e à esquerda.**
- Então podemos definir um conjunto de duas regras básicas:
 - **Se uma célula está estimulada no tempo t , ela não estará no tempo $t+1$.**
 - **Se uma célula não está estimulada no tempo t , ela ficará no tempo $t+1$ se pelo menos um vizinho seu está estimulado no tempo t .**
- O conjunto destas regras consiste no que podemos e vamos chamar de função de transição (f).
- Então a função de transição depende dos estados da própria célula e de suas vizinhas.



Exemplo Simples



- Abaixo se encontra um esquemático deste exemplo, onde é mostrado como funciona a transição de estados das células.





Definição Formal de Autômatos Celulares



- Seja:
 - L um reticulado regular (os elementos de L são chamados de células),
 - S um conjunto finito de estados,
 - N um conjunto finito (de tamanho $|N| = n$) de índices vizinhos,
 - f uma função de transição.
- Chamamos a 4-tupla (L, S, N, f) um autômato celular.



Exemplo: Game of Life



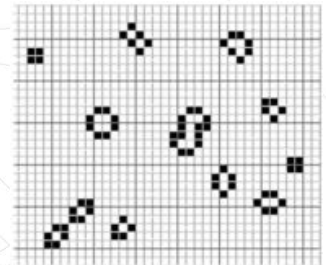
- Game of Life é um autômato celular criado em 1970 por um jovem matemático chamado **John Horton Conway**, com o objetivo de explorar como regras simples poderiam dar surgimento a estruturas que simulavam a **vida e comportamento**.
- Ele acreditava que "organismos" no seu mundo artificial podiam atuar como aqueles do mundo real – movendo, crescendo, reproduzindo, evoluindo e, talvez, até mesmo pensando.
- Sua meta era criar um **simulador de células** com três objetivos:
 - nenhum desenho (colônia) simples iria obviamente crescer para sempre, algumas colônias simples deveriam crescer selvagememente, garantir que colônias simples poderiam levar muito tempo para desaparecer ou estabilizar.



Exemplo: Game of Life (Jhon Conway)



- O simulador Life segue a uma regra de produção bidimensional que obedece às seguintes regras gerais de produção:
 1. todas as células que tiverem duas ou três células vizinhas permanecem vivas,
 2. em todos os espaços ocupáveis por células que tiverem três vizinhas, nascerá uma célula na próxima geração e
 3. em qualquer outro caso a célula perecerá.
- Vale observar que cada posição ocupável por células possui um estado "viva" ou "não viva".

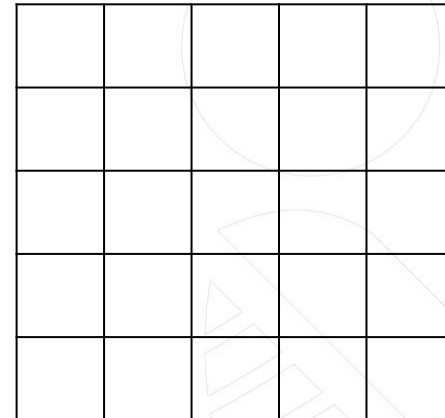
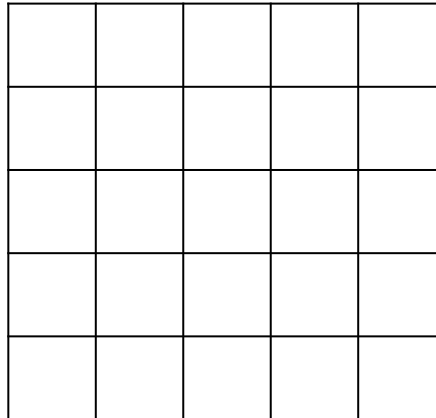
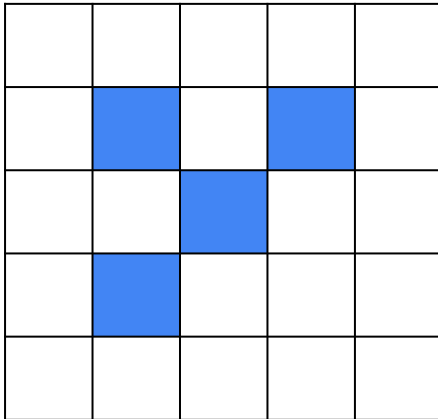




Aplicação



- Regras:
 - Menos 2 vizinhos - Morre
 - 2 ou 3 vizinhos - Vive
 - Mais de 3 vizinhos - Morre
 - 3 Vizinhos - Nasce

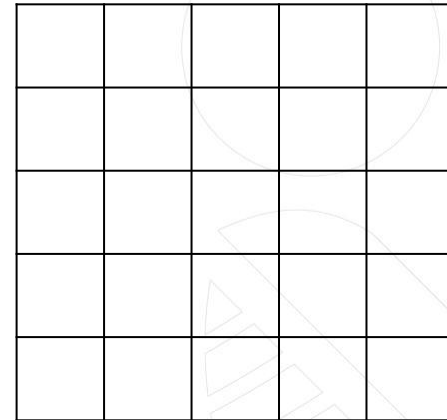
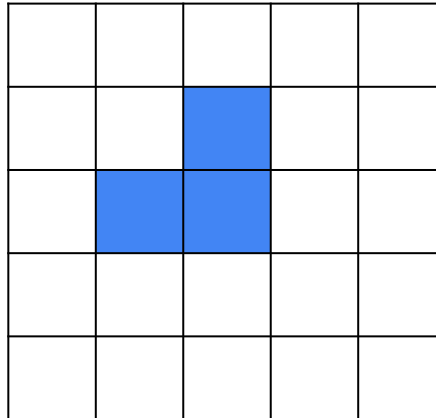
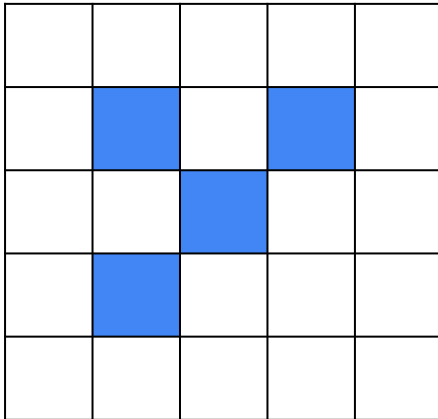




Aplicação



- Regras:
 - Menos 2 vizinhos - Morre
 - 2 ou 3 vizinhos - Vive
 - Mais de 3 vizinhos - Morre
 - 3 Vizinhos - Nasce

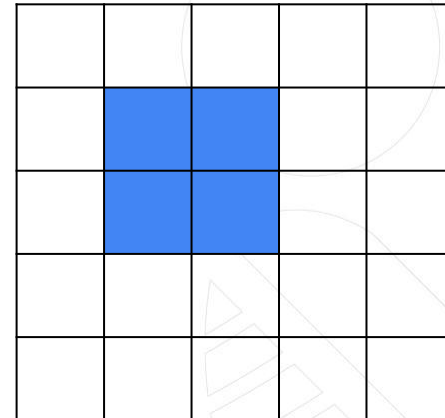
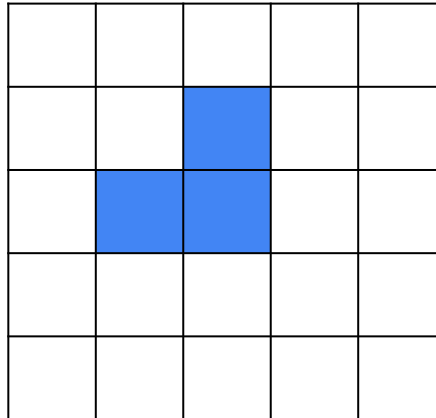
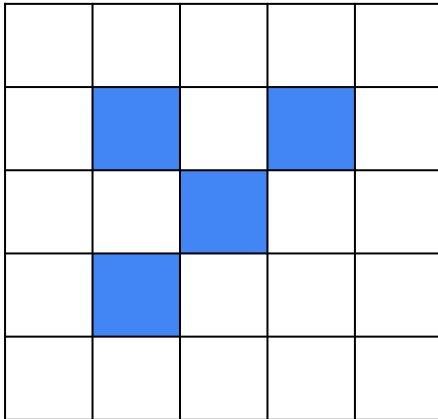




Aplicação



- Regras:
 - Menos 2 vizinhos - Morre
 - 2 ou 3 vizinhos - Vive
 - Mais de 3 vizinhos - Morre
 - 3 Vizinhos - Nasce





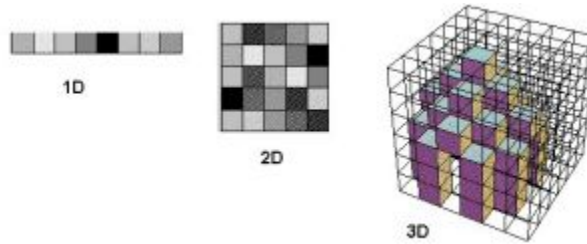
Especificações na Construção de um Sistema Autômato Celular



- Ao se aplicar um sistema de autômatos celulares a um dado problema, é preciso especificar o sistema em relação a alguns pontos básicos, como, por exemplo, a geometria do sistema, quais serão os vizinhos de uma dada célula, etc.
- Para um sistema de autômatos celulares, é necessário que se tenha uma geometria regular.
- A geometria do sistema pode ser classificada quanto a dois pontos: a **dimensão** e o **formato da célula**.

Dimensão

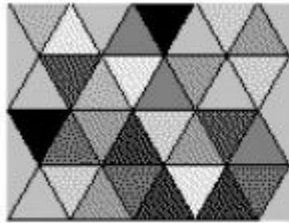
- Podemos ter um autômato celular de uma, duas ou três dimensões.
- No autômato unidimensional, as células estão distribuídas linearmente.
- No bidimensional, teremos uma distribuição no plano e no tridimensional, uma distribuição espacial.



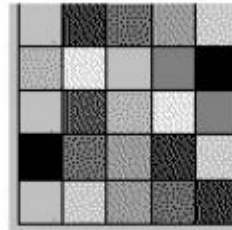


Formato da Célula

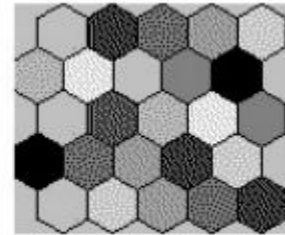
- As células podem ser de várias formas (triangular, quadrangular, hexagonal, etc), desde que num mesmo autômato todas as células sejam de uma mesma forma.



Triangular



Quadrangular



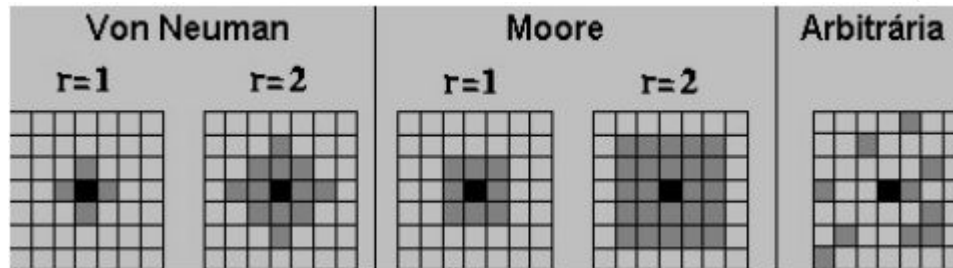
Hexagonal



Tamanho da Vizinhança



- É necessário também especificar quais serão os vizinhos de uma célula, pois as regras de transição serão aplicadas baseadas nos estados deles e da própria célula.
- Há algumas formas de vizinhança que seguem uma lógica ou regra (von Neumann e Moore) e há formas que são arbitrárias.
- Na figura abaixo, as células de cinza escuro estão representando as vizinhas da célula preta. (e r é o raio da vizinhança)





Condições de Limite (ou contorno)



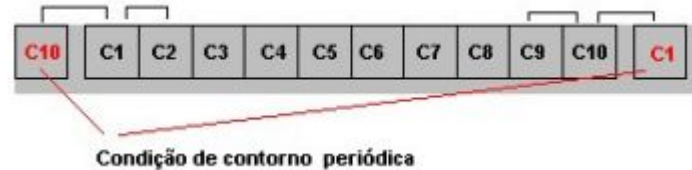
- Geralmente há uma necessidade de que o autômato seja infinito em todas as dimensões, mas é impossível que isso seja implementado em um computador (por limitação de espaço de memória), então precisamos determinar condições de limite para que possamos simular um autômato infinito.
- Estas condições de limite indicam como o autômato se encontra além do
- Estas condições são também necessárias para completar o conjunto de vizinhos das células que se encontram nas bordas do autômato.
- **Por exemplo:** as células que se encontram na extremidade esquerda não terão vizinhos à sua esquerda.
 - A condição de limite irá justamente simular o comportamento daquelas células que na verdade não existem.
- Há vários tipos de condições de limite, das quais citaremos três.



Condições de Limite – Limite Periódico



- São obtidos periodicamente estendendo-se o autômato.
- É como se o autômato fosse copiado nas bordas, da maneira como ele se encontra num dado instante.
- Para um ganho de tempo e memória, não precisamos colocar o autômato inteiro, basta colocarmos um pedaço dele (que são as r colunas ou r linhas mais próximas, e r é o raio da vizinhança).



- Esquema de um autômato unidimensional com raio de vizinhança 1 e condição de contorno periódica



Condições de Limite – Limite Reflexivo



- Esta condição de contorno é obtida refletindo-se o autômato em cada limite.



Condição de contorno reflexiva(com $r=2$, onde r é o raio da vizinhança)

- Esquema de um autômato unidimensional com raio de vizinhança 2 e condição de contorno reflexiva



Condições de Limite – Limite de Valores Fixos



- Esta condição de limite é obtida, simplesmente descrevendo como serão os estados das células no contorno do autômato, e estes estados serão os mesmos em qualquer instante da simulação.
- Por exemplo, se um autômato tem 2 estados possíveis para uma célula, PRETO e BRANCO, podemos determinar uma condição de limite onde todas as células no contorno são BRANCAS, como se vê na figura abaixo.



Condição de contorno com valores fixos (no caso, BRANCO)



Condições Iniciais



- Um outro ponto importante na implementação de um sistema de autômatos celulares é a condição em que o sistema se encontra no tempo inicial (t_0).
- Dependendo de como o sistema seja iniciado, diferentes evoluções são obtidas.
- Dependendo do caso, podem ser obtidos padrões que permanecem constantes indeterminadamente, que se anulam, ou que permanecem num estado aparentemente aleatório.



Conjunto de Estados



- Todo autômato celular **deve** ter **um conjunto de estados**, que serão os possíveis estados em que as células poderão se encontrar.
- Por exemplo, o conjunto de estados pode ser um conjunto de cores (preto, branco e azul), uma certa propriedade (ligado e desligado), etc.
- Cada célula poderá encontrar-se em apenas um estado, e em qualquer instante, algum estado pode não ocorrer no autômato.
- Por exemplo: Digamos que o conjunto de estados seja composto pelas cores AZUL, VERMELHO, VERDE e PRETO. Então uma célula só poderá estar com apenas uma destas cores e alguma cor pode não ocorrer em nenhuma célula deste autômato.
- É interessante que este conjunto de estados seja tão menor quanto possível, pois o número de elementos da tabela de regras cresce exponencialmente.



Regras de Transição de Autômatos Celulares (tabela de transição ou ainda função de transição)



- Para implementação de um sistema autômato celular, a mais importante especificação do sistema é a tabela de transição, pois é como for especificada a tabela de transição que fará com que o sistema evolua de um modo ou de outro.
- Por exemplo, para o jogo da vida que é mostrado como exemplo, uma das regras de transição diz que se uma célula está viva, ela só continuará nesse estado se exatamente dois ou três de seus oito vizinhos estiverem vivos.



Regras de Transição de Autômatos Celulares (tabela de transição ou ainda função de transição)



- De acordo com a finalidade, as regras de transição devem estar o mais próximo possível da realidade.
- Existem algumas formas de se especificar a função de transição.
 - Especificação Direta
 - Regras Totalísticas
 - Especificação Implícita e Multi-Passos
 - Regras Probabilísticas



Regras Totalísticas



- Algumas vezes não importa exatamente qual o estado de cada vizinho de uma determinada célula, mas a quantidade total de células vizinhas que estão num determinado estado.
- Por exemplo, no jogo da vida, como foi dito, para uma célula manter-se viva é necessário que a quantidade de células vivas ao redor seja dois ou três.
- Esse tipo de representação das regras é chamado de totalístico.
- No caso de ser considerado também o estado atual da célula a ser modificada, essa representação é chamada de totalística exterior.



Especificação Direta



- Uma especificação direta da tabela de transição consiste na listagem de todos os possíveis estados das células vizinhas, da própria célula, e do próximo estado.
- Por exemplo, para o autômato de uma dimensão considerado no exemplo da propagação do pulso na corda, temos as seguintes quádruplas do formato.
 - (estado vizinho 1, estado do vizinho 2, estado da célula, próximo estado)
 - O para não estimulada
 - para estimulada

(0,0,0,0) (0,0,1,0)
(1,0,0,1) (0,1,1,0)
(0,1,0,1) (1,0,1,0)
(1,1,0,1) (1,1,1,0)

Como as variáveis da função de transição nesse caso são $2n$ ($n=3$), temos 8 possibilidades, mas em um sistema de grande porte teríamos um número bem elevado de possíveis entradas, o que torna esse tipo de especificação bastante tediosa.



Especificação Implícita e Multi-Passos



- A especificação pode ser determinada por uma fórmula onde as variáveis representam os estados das células vizinhas ou o estado da própria célula.
- Por exemplo, o estado da célula r pode ser dado pela fórmula
 - $C(r) = \{\text{célula } r-1 \text{ está ativa ou célula } r+1 \text{ está inativa}\}.$
- Multi-passos consiste na forma como é avaliada a fórmula da função de transição.
- As variáveis das fórmulas podem ser avaliadas em passos diferentes, ou seja, por exemplo, pode-se avaliar na fórmula anterior primeiro quais as células inativas para todas as células do autômato e depois as células ativas, contanto que sejam seguidas as definições de autômatos celulares descritos na seção de definições.



Regras Probabilísticas



- Em algumas situações pode-se associar a cada configuração da vizinhança diferentes saídas da função de transição atribuindo probabilidades a essas diferentes saídas.
- Ou seja, para uma dada configuração dos vizinhos, uma célula pode partir para um ou outro estado com probabilidade definida.
- É preciso lembrar que a soma das probabilidades de cada possível saída deve ser 1.
- Podemos tomar novamente o exemplo da propagação do pulso na corda, no qual uma célula se estiver estimulada no tempo t_0 , não estará no tempo t_1 .



Regras Probabilísticas



- Poderíamos então definir as seguintes regras:
 - Se uma célula está estimulada no tempo t , ela estará não-estimulada no tempo $t+1$ com probabilidade p e estará ainda estimulada com probabilidade $(1-p)$.
 - Se uma célula não está estimulada no tempo t , ela ficará no tempo $t+1$ se pelo menos um vizinho seu está estimulada no tempo t .
- Dessa maneira temos que uma dada célula pode estar não-deterministicamente em algum estado relativo a uma dada configuração da vizinhança.



Exemplos de regras



- **Jogo da Vida**
 - Se uma célula está OFF, ela fica ON se exatamente 3 dos seus vizinhos estão ON;
 - Se uma célula está ON, ela continua ON se exatamente 2 ou 3 de seus vizinhos estão ON; caso contrário, ela fica OFF.
- **Emergence**
 - Se uma célula está ON, ela fica OFF, independentemente dos estados de seus vizinhos;
 - Se uma célula está OFF, ela fica ON, se exatamente 2 de seus vizinhos estão ON; caso contrário, ela permanece OFF.
- **Personalizado**
 - Neste jogo, o usuário informa as regras de transição. As regras do estilo personalizado seguem uma idéia básica: uma célula muda de estado (ON para OFF ou OFF para ON), se ela possui exatamente X ou Y ou Z ou ... vizinhos ONs. Estes valores (X,Y,Z,...) variam entre 0 e 8



Aplicações de Sistemas de Autômatos Celulares



- Sistemas de autômatos celulares têm uma aplicação muito interessante na simulação de situações reais.
 - Pode-se simular um sistema de partículas onde as interações (ou choques) entre as moléculas são responsáveis pelas transições de estado.
 - Uma aplicação semelhante seria a simulação do sistema de tráfego de uma cidade ou ainda a propagação de um incêndio numa floresta.
 - Outra utilidade de autômatos celulares consiste num sistema de vida artificial, que são simulações por computador de sistemas vivos reais.
 - Simulação do desenvolvimento de um conglomerado de bactérias num tecido humano ou ainda o desenvolvimento de uma espécie numa determinada área.
 - Um dos ramos muito importante também do uso de autômatos celulares diz respeito à geração e ao processamento de imagens por computador.



02

Exemplos Clássicos

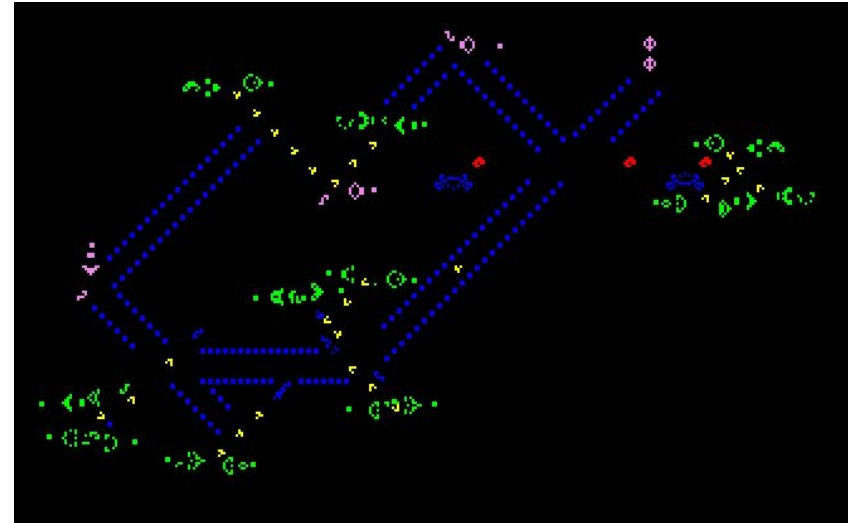


Jogo da Vida (Game of Life) - John Conway



Regras:

- Uma célula viva com menos de 2 vizinhos vivos morre (solidão).
- Uma célula viva com 2 ou 3 vizinhos vivos sobrevive.
- Uma célula viva com mais de 3 vizinhos vivos morre (superpopulação).
- Uma célula morta com exatamente 3 vizinhos vivos nasce (reprodução).





Regra 110 - Computação Universal



Em um autômato celular elementar, um padrão unidimensional de 0s e 1s evolui de acordo com um conjunto simples de regras. Se um ponto no padrão será 0 ou 1 na nova geração depende de seu valor atual, bem como daqueles de seus dois vizinhos. O autômato da Regra 110 tem o seguinte conjunto de regras:

Padrão atual	111	110	101	100	011	010	001	000
Novo estado para célula central	0	1	1	0	1	1	1	0

O nome "Regra 110" deriva do fato de que esta regra pode ser resumida na sequência binária 01101110; interpretada como um número binário, isso corresponde ao valor decimal 110. Este é o esquema de nomenclatura de código Wolfram.



Regra 110 - Computação Universal



current automaton contents



rule 110 (01101110)



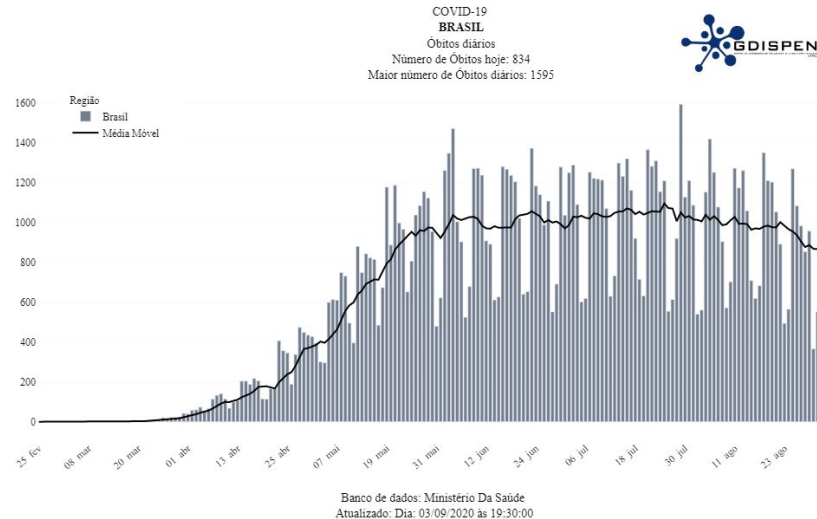
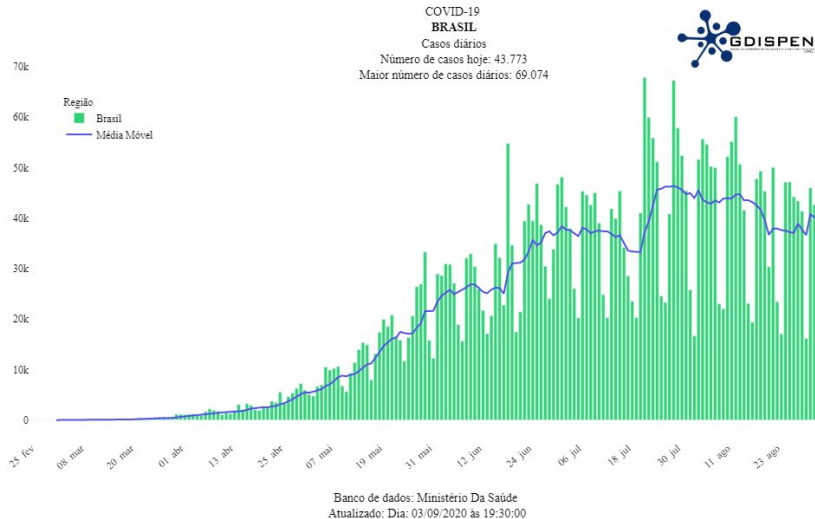
the next generation of the automaton



Propagação de Epidemias (COVID-19)



- Cada célula representa um indivíduo.
- Estado das células: Saudável (S), Infectado (I), Recuperado (R).
- Vizinhança determina a transmissão do vírus.
- Regras baseadas na Taxa de Contágio e Período de Recuperação.





Outras Situações



- **Trânsito Urbano**
 - Simulação de congestionamentos urbanos.
 - Células representam veículos e mudam de estado conforme regras de fluxo.
- **Propagação de Incêndios Florestais**
 - Cada célula pode estar em três estados: Vegetação, Fogo, Cinzas.
 - Se um vizinho estiver pegando fogo, a probabilidade de combustão aumenta.



Ferramentas

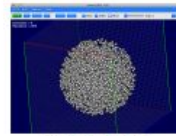


- **Golly (Software de simulação de AC)**

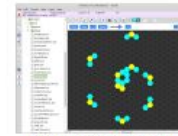
Click to enlarge these screen shots:



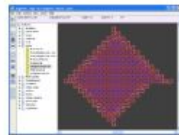
overlay-demo.lua [Windows]



3D.lua [Mac]



hexgrid.lua [Linux]



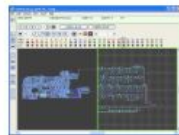
Langton's Loops [Windows]



Larger than Life [Mac]



Prime calculator [Linux]



Cloned layers [Windows]



Stacked layers [Mac]



Meta galaxy [Linux]

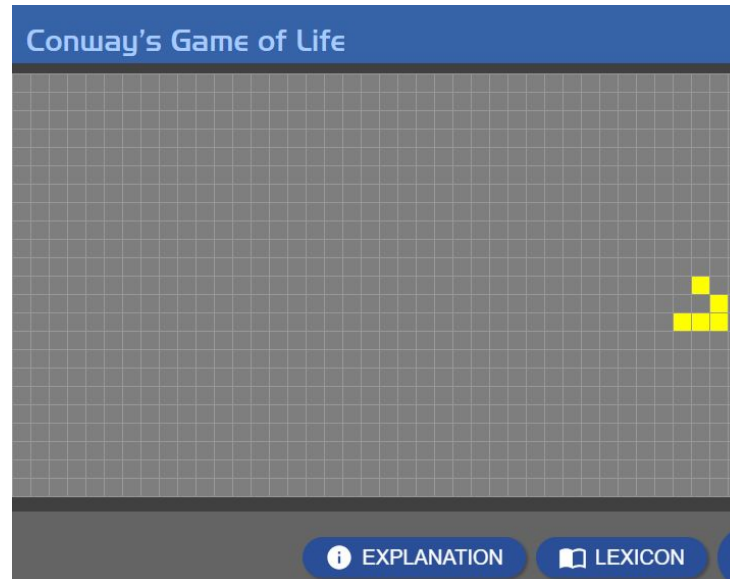




Ferramentas



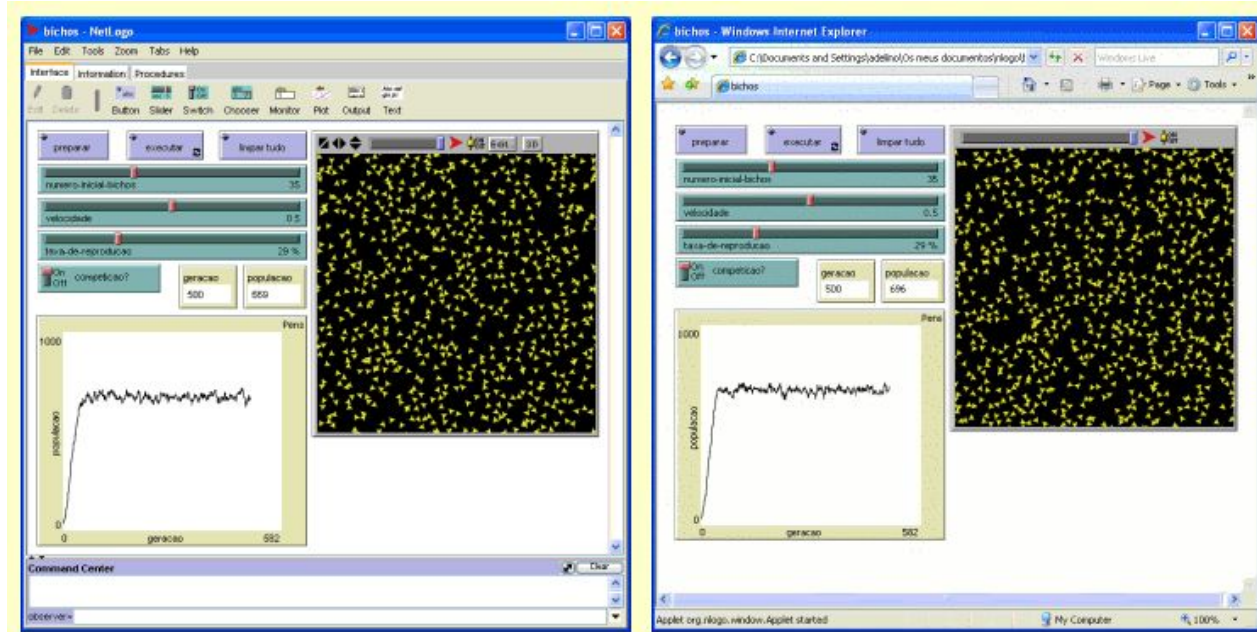
- **PlayGameOfLife.com (Jogo da Vida online)**



Ferramentas



- NetLogo (Simulação de sistemas complexos)





OBRIGADO!

MEUS CONTATOS:

douglasaquino817@gmail.com
(63) 999835068



UNITINS



GOVERNO DO
TOCANTINS
TRABALHANDO E CUIDANDO DE **TODOS**