Autômatos celulares: Conceitos e aplicações em sistemas complexos na natureza

Filipe Cattoni, Victor Requia

[a] *UDESC, Joinville, SC, Brazil*

Abstract

Entender a conduta e padrões de eventos ou indivíduos na natureza, pode ser simples e algorítmico se vistos de forma singular e unidirecional, porém quando vistos de forma interativa, sistêmica e multidirecional, com grande diversidade de células, podemos ter um comportamentos inesperados, por mais que cada indivíduo respeite as regras naturais. Este estudo mostra alguns dos sistemas complexos encontrados na natureza, analisados por meio de simulação utilizando autômatos celulares, além da apresentação dos principais conceitos envolvendo autômatos celulares e uma breve discussão sobre a real retratação dos simuladores com os sistemas complexos reais.

Keywords:
Automato celular, Jogo da vida, Sistemas complexos, Aplicações reais

1. Introdução

Na área de ciência de computação, existem diversos modelos de computação que podem ser usados para descrever o funcionamento da computação de diversos modelos matemáticos. Dessa forma, é possível categorizar grupos de algoritmos que executam de formas parecidas, tendo similares complexidades computacionais, e estudá-los em seus contextos específicos. (Savage 1998)

Dentro da categoria de modelos de computação, existe o modelo de autômatos celulares. Os autômatos celulares são um modelo de autômatos que consistem em um campo com regras definidas no qual, componentes existem, seguindo essas regras, e passando por diversas iterações e normalmente são bastante dependentes das condições iniciais. Os autômatos celulares podem ser pensados como seus próprios universos simulados, de forma simplificada. O espaço

Preprint submitted to Seminário Universitário de Computabilidade da UDESC July 23, 2022

desses universos, ou campos, é definido como uma rede uniforme de células, no qual um componente ocupa uma célula. Esses autômatos podem ser úteis para modelar e estudar sistemas muito mais complexos, e até sistemas que ocorrem na própria natureza. Em curto, eles permitem uma forma de estudo e análise da evolução de grandes sistemas físicos. (Toffoli and Margolus 1987)

2. Conceitos

Os primeiros modelos de autômatos celulares foram inicialmente propostos por John Von Neumann por volta de 1940 e os principais objetivos eram:

- Representar matematicamente a evolução natural de sistemas complexos
- Desenvolver máquinas de auto-replicação, através de um conjunto de regras matemáticas
- Estudar auto-regulação em sistemas complexos

Segundo (Wolfram 2002), autômatos celular são formados por uma rede de células que possuem seus estados alterados em um tempo discreto (1,2,3,4...) de acordo com seu estado anterior e o estado das suas células vizinhas. Os autômatos celulares possuem características e regras importantes, podemos citar:

- Homogeneidade: as regras são iguais para todas as células
- Estado discreto: cada célula pode estar em um dos finitos estados
- Interações locais: o estado de uma célula depende apenas das células mais próximas (vizinhas)
- Processo dinâmico: a cada instante de tempo, as células podem sofrer uma atualização de estado

Definimos um automato celular, usando a 5-tupla $A=(R,S,S_0,V,F)$ no qual:
R é a grade de células de n dimensões
S é o conjunto de estados de uma célula c
S_0 é o estado inicial do sistema
V é o conjunto vizinhança (define quem são os vizinhos de cada célula)

F é a função de transição (regras que governam a evolução do sistema no tempo)

2.1. Classificação dos autômatos

A grande maioria dos conjuntos de regras elementares vistos anteriormente, produzem um resultados sem sentidos ou não foi encontrado uma aplicação até então, por outro lado, outros podem resultar em padrões complexos e com aplicações complexas no mundo real. Wolfram, além das características também desenvolveu 4 classes de regras para um autômato celular elementar:

- Uniformidade (Classe 1): A grade chega ao fim depois de um certo número de gerações, com cada celular contante.
- Repetição (Classe 2): Assim como a classe 1, os os autômatos celulares da classe 2 também permanecem constante, porém os estados das células não são constantes, oscilando em padrões regulares periódicos.
- Aleatório (Classe 3): São estruturas que não possuem um padrão perceptível, levando a um padrão caótico.
- Complexidade (Classe 4) Podemos encontrar padrões repetitivos e oscilantes dentro desta classe. Esta classe exibe as propriedades de sistemas complexos

3. Aplicações

Um bom exemplo para explicar sistemas complexos aplicados na vida real, autômatos celulares e como estes se conversam, é imaginar o sistema nervoso cerebral. O cérebro humano é constituído por pequenas células (como células em um autômato celular) chamadas de neurônios, ligadas por outras células vizinhas através de sinapse. Todos essas células possuem uma estrutura interna semelhante e reagem da mesma maneira a estímulos exteriores controlados (regras de um automato celular). Apesar de entendermos bem o funcionamento de um neurônio, eles não explicam as funções que o cérebro realiza globalmente ou sejam o indivíduo não explica o funcionamento do todo. Existem outros mecanismos resultantes da interação entre os neurônios. Podemos classificar esse funcionamento como da classe 4 por

Wolfram, pois é um sistema complexo, e aparece associado a efeitos colectivos que são o resultado observável do comportamento global do sistema, quer seja um sistema biológico ou físico (Rui 1992).

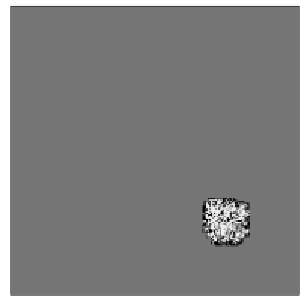
Outro exemplo de sistema complexo na natureza é um gás no interior de um recipiente. No estado macroscópio, pode ser especificado pela pressão, temperatura e densidade, não dependendo das características internas dos átomos. De forma microscópica, podemos ter diversos outros componentes correspondendo ás posições e velocidades dos átomos.À descrição macroscópica, em termos de pressão, temperatura e densidade, constitui o domínio da física designado por termodinâmica (Rui 1992).

Nos sistemas (físicos) que manifestam comportamentos caóticos, turbulentos e não-lineares, a nossa capacidade de cálculo e previsão é muito pequena, não havendo, no estado atual do conhecimento, outra alternativa senão a da simulação em laboratório. Ora isto torna-se impraticável quando o sistema em questão é, por exemplo, a atmosfera terrestre e queremos fazer previsões climáticas. A aplicabilidade dos modelos de autômatos celulares à simulação destes sistemas aparece como uma alternativa e, devido à ligação direta entre os modelos de autômatos e a teoria da computação, a natureza aparece como uma gigantesca máquina de cálculo (Rui 1992).

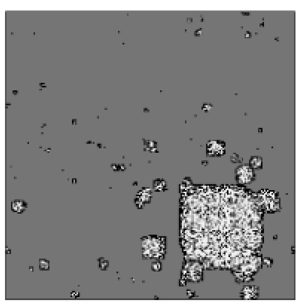
Podemos encontrar algumas formas mais práticas em que problemas existentes no mundo real podem ser resolvidos utilizando autômatos celulares. O trabalho de (Sree and Babu 2014) cita alguns exemplos em que esses autômatos podem ser utilizados para resolver problemas no campo de bioinformática. Os autores desenvolveram um modelo de autômatos celulares, junto com uma ferramenta auxiliar, que os permitiram prever a codificação de estruturas de proteínas e também identificar regiões de promotores. Eles também conseguiram estender o modelo desenvolvido para também prever a estrutura secundária das proteínas. Os autores analisaram diversos outros modelos existentes para a realização dessas tarefas e notaram que o uso de autômatos celulares se apresentou mais eficiente, e atingiu um nível de precisão de 82%.

Outro exemplo do uso de autômatos celulares na resolução de problemas complexos na natureza, pode ser encontrado no artigo publicado por (Melotti 2009) nele, o autor mostra a simulação da propagação de uma pandemia usando autômatos celulares, desenvolvendo 8 cenários com diferentes variáveis que mudam o comportamento das células e regras como, vacinação e incubação, avaliando os resultados de forma quantitativa e qualitativa em uma população hipotética de 40000 indivíduos (matriz 200 x 200). Um exemplo feito se encontra na figura 1.

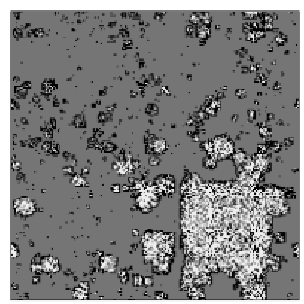
(a) t=0



(b) t=16



(c) t=29

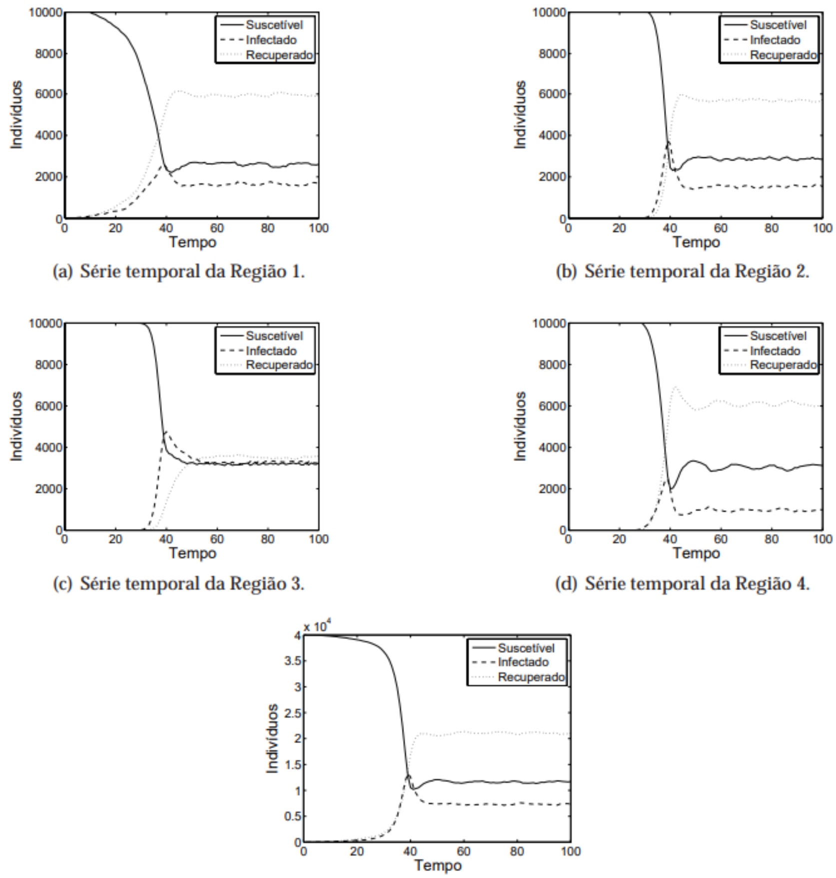


(d) t=32

Figure 1: cenário do AC considerando o deslocamento L: a) instante de tempo em t = 0, b) instante de tempo em t = 16, c) instante de tempo em t = 29, d) instante de tempo em t = 32. A Região 1 tem Pc = 0,50 e Pd = 0,20, a Região 2 tem Pc = 0,60 e Pd = 0,30, a Região 3 tem Pc = 0,30 e Pd = 0,70 a Região 4 tem Pd = 0,10 e Pc = 0,70. Todas as regiões foram simuladas com $\beta = 3,5$. As cores cinza, preto e branco representam respectivamente indivíduos suscetíveis, infectados e recuperados.

Observe que na Região 3 (Figura 1), indica uma região mais propícia para o espalhamento da doença, pois o número de indivíduos infectados aumenta mais rápido que nas outras regiões (Melotti 2009)

Os comportamentos dos indivíduos para cada região em relação ao tempo, pode ser visto na figura 2.



(a) Série temporal da Região 1.

(b) Série temporal da Região 2.

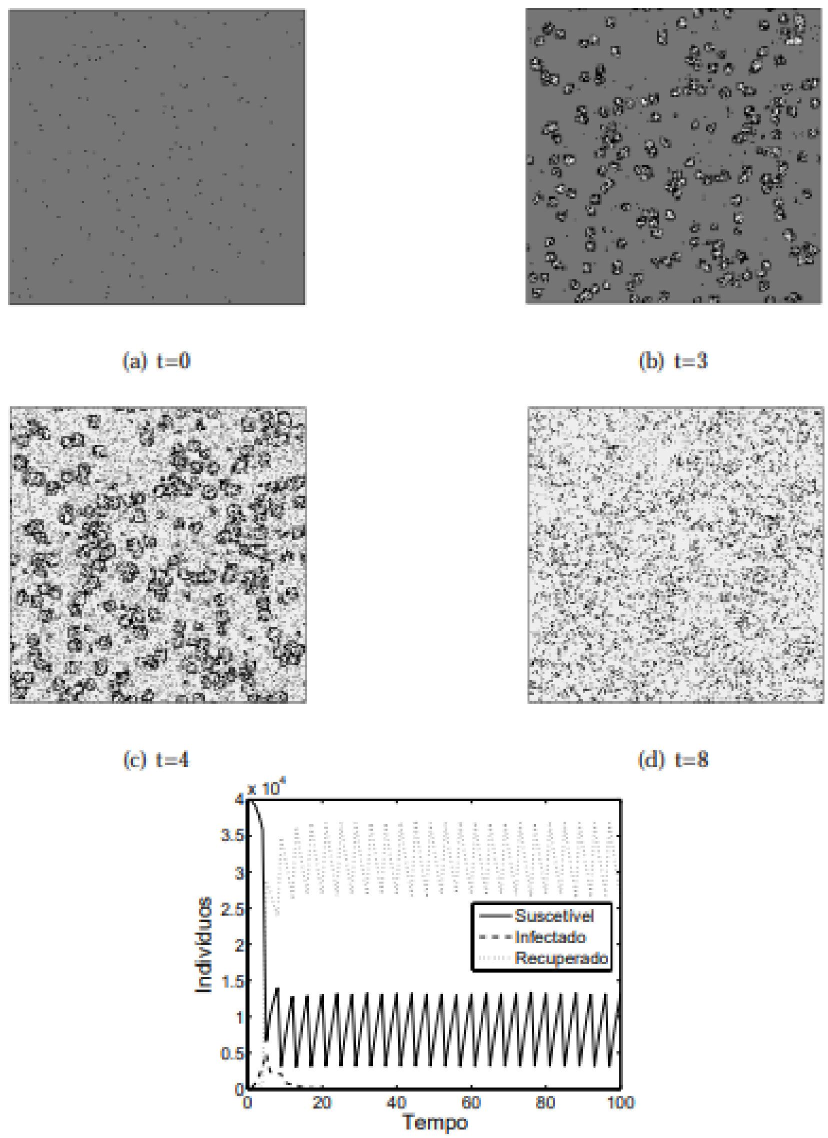
(c) Série temporal da Região 3.

(d) Série temporal da Região 4.

(e) Série temporal total do AC.

Figure 2: a) região R1, b) região R2, c) região R3, d) região R4 e e) a série total do AC. A Região 1 tem Pc = 0,50 e Pd = 0,2, a Região 2 tem Pc = 0,60 e Pd = 0,30, a Região 3 tem Pc = 0,30 e Pd = 0,70 a Região 4 tem Pd = 0,10 e Pc = 0,70. Todas as regiões foram simuladas com $\beta = 3,5$

Por questão de comparação, vamos apresentar outro cenário (figura 3), também retirado do artigo, que mostra um cenário um pouco diferente



(a) t=0 (b) t=3

(c) t=4 (d) t=8

(e) Séries temporais do AC do sétimo cenário.

Figure 3: Taxa de vacinação aplicada no AC, considerando o deslocamento L: a) instante de tempo em t = 0, b) instante de tempo em t = 3, c) instante de tempo em t = 4, d) instante de tempo em t = 8. 80% dos indivíduos suscetíveis foram vacinados a cada quatro instante de tempo. As cores cinza, preto e branco representam respectivamente indivíduos suscetíveis, infectados e recuperados. Os parâmetros usados foram o mesmo do AC da Figura 5.2. A figura e) representa as séries temporais que mostram as populações de indivíduos S (—), I (- - -) e R (. . .).

Neste cenário, também utilizando um autômato celular, exite uma variável chamada vacinação, amenizando as mortes e quantidade de indivíduos suscetíveis além de uma maior quantidade de indivíduos infectados inicialmente que no cenário anterior.

Note que se comparados, os cenários são totalmente diferentes em questões de tempo e variação no comportamento das células, alterando simplesmente variáveis inicias, já é visível a modificação global de comportamento das células, simulando de forma autentica o comportamento de uma pandemia real.

4. O Jogo Da Vida

Certamente um dos exemplos mais famosos de autômatos celulares é o Jogo da Vida de John Conway. O Jogo da Vida foi um modelo de autômato celular que simula um jogo de simulação com o campo e as células do autômato. As células no Jogo da Vida são definidas de maneira binária, sendo que cada célula somente pode existir em um estado ”vivo” ou ”morto”. Conway definiu algumas regras básicas para o comportamento das células, tentando replicar regras de crescimento e decrescimento genéticas, a fim de que as células do jogo se comportem como organismos vivos.

O Jogo da Vida se compõe em quatro regras básicas que cada célula segue a cada iteração (chamadas de ”gerações” no Jogo) que descrevem se a célula ira permanecer viva ou morta (Gardner 1970):

- Uma célula viva com dois ou três vizinhos vivos irá permanecer viva para a próxima geração.

- Uma célula viva com um ou zero vizinhos morre de isolamento na próxima geração.

- Uma célula viva com mais de três vizinhos morre de sobrelotamento na próxima geração.

- Uma célula morta com exatamente três vizinhos é uma célula de ”nascimento”, e se torna uma célula viva na próxima geração.

Tendo em mente essas regras, existem várias estruturas que aparecem frequentemente em simulações do Jogo da Vida. Essas estruturas geralmente são categorizadas como estruturas estáveis: estruturas que não mudam de uma geração para outra, estruturas oscilantes: estruturas que passam por

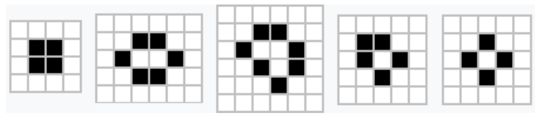


Figure 4: Alguns exemplos de estruturas estáveis

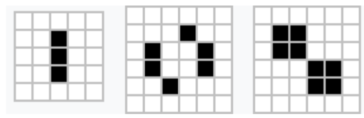


Figure 5: Alguns exemplos de estruturas oscilantes

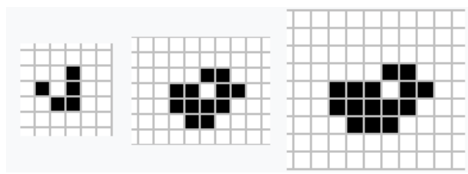


Figure 6: Alguns exemplos de estruturas naves

diversos estados até voltarem ao seu estado original, e estruturas naves: estruturas que movimentam a sua configuração para coordenadas diferentes do campo. (Johnston and Greene 2022) As figuras 4,5 e 6 mostram algumas dessas estruturas.

Mesmo parecendo um jogo simples, o Jogo da Vida foi provado a ser Turing completo, podendo simular qualquer outra máquina de Turing dado recursos e tempo o suficiente. É possível criar portas lógicas utilizando as estruturas descritas anteriormente, especialmente as naves. O trabalho de (Rendell 2015) mostra isso com uma implementação completa de uma máquina de Turing utilizando uma configuração inicial do jogo.

5. Autômatos celulares e máquinas de Turing

O sistema de gás apresentado no tópico 3, pode ser representado em uma máquina de Turing unidimensional. A rede equivale à fita da máquina de Turing na qual, cada célula é uma posição na fita contendo um símbolo. Para cada modificação de uma célula, a máquina realiza três tipos de movimento: desloca-se para trás uma posição, desloca-se para a frente duas posições e desloca-se para trás uma posição. Os estados do programa correspondem às 64 combinações possíveis transições feitas em um tempo pelas regra deste autômato celular. A importância de se obter essa formalização de autômatos celulares pela máquina de Turing tem seu valor para fundamentar e simular eficientemente sistemas complexos de forma matemática e comprovável.

6. Conclusão

Apesar da evolução tecnológica ao longo dos anos ter ajudado a entender diversos fenômenos da natureza, determinar o comportamentos com precisão de sistemas complexos, principalmente comportamentos que parecem ser aleatórios, é um desafio para muitos pesquisadores. Um modelo que pode ajudar muito no entendimento de padrões e comportamento individual para entender o global são os autômatos celulares. Este trabalho abordou alguns dos tópicos julgados mais interessante pelos autores, transparecendo alguns dos principais conceitos sobre os autômatos celulares, além de mostrar algumas aplicações reais na natureza.

References

[Gardner 1970] Gardner, M. (1970). Mathematical games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, 223.

[Johnston and Greene 2022] Johnston, N. and Greene, D. (2022). *Conway's Game of Life: Mathematics and Construction*.

[Melotti 2009] Melotti, G. (2009). Aplicaçao de autômatos celulares em sistemas complexos: Um estudo de caso em espalhamento de epidemias.

[Rendell 2015] Rendell, P. (2015). A turing machine in conway's game of life, extendable to a universal turing machine. http://rendell-attic.org/gol/tm.htm. Accessed: 2022-07-22.

[Rui 1992] Rui, D. (1992). Autómatos celulares, máquinas de turing ou a natureza como máquina de cálculo.

[Savage 1998] Savage, J. E. (1998). *Models of Computation: Exploring the Power of Computing*. Brown University.

[Sree and Babu 2014] Sree, P. K. and Babu, I. R. (2014). Cellular automata and its applications in bioinformatics: A review. *Global Perspectives on Artificial Intelligence*, 2.

[Toffoli and Margolus 1987] Toffoli, T. and Margolus, N. (1987). *Cellular Automata Machines: A new environment for modeling*. The MIT Press.

[Wolfram 2002] Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.