



**Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)**

**Departamento de Estatística e Informática (DEINFO)**

**Cellular Automata**

**Jonas Albuquerque**

**Emergência e Complexidade em Autômatos Celulares: Uma Implementação do Jogo da Vida de Conway com Análise Quantitativa**

**Autor:** Karine Vitória de Fraga Alves

**Resumo.** Os Autômatos Celulares (AC) são modelos matemáticos que demonstram como interações locais simples podem gerar comportamentos globais complexos e auto-organizados. O exemplo mais emblemático de um AC é o "Jogo da Vida", concebido por John Horton Conway em 1970. Este trabalho apresenta uma implementação computacional do Jogo da Vida utilizando a linguagem Python e a biblioteca NumPy. O objetivo é demonstrar visualmente os princípios fundamentais dos autômatos celulares, incluindo o conceito de emergência, onde padrões complexos e dinâmicos surgem a partir de apenas quatro regras básicas. A implementação também inclui padrões clássicos como a "Gosper Glider Gun" e o "Pulsar", e realiza uma **análise quantitativa da densidade de células vivas ao longo do tempo**, provando a capacidade do sistema de gerar dinâmicas complexas e mensuráveis. O código-fonte, disponibilizado publicamente, serve como uma ferramenta prática para o estudo da teoria da computação e sistemas complexos.

## 1. Introdução

A noção de que a complexidade pode surgir da simplicidade é uma das ideias mais profundas da ciência. Na computação, essa ideia foi formalizada por John von Neumann, que investigou a possibilidade de máquinas autorreplicantes. Inspirado por esse trabalho, o matemático britânico John Conway procurou criar um sistema o mais simples possível que ainda pudesse exibir um comportamento complexo e imprevisível. O resultado foi o "Jogo da Vida" [1].

O Jogo da Vida não é um jogo no sentido tradicional; é uma simulação de "soma-zero", o que significa que sua evolução é determinada inteiramente por seu estado inicial, não exigindo mais nenhuma entrada de um jogador humano. Ele consiste em uma grade bidimensional de células, cada uma podendo estar em um de dois estados: "viva" ou "morta".

A relevância do Jogo da Vida transcende a recreação matemática. Ele serve como um modelo para estudar a auto-organização em sistemas biológicos, a formação de padrões na natureza e os limites da computabilidade. O fato de um sistema com regras tão triviais ser capaz de simular um computador universal (ser Turing Completo) [2] tem profundas implicações para a filosofia da ciência e a inteligência artificial.

Este trabalho detalha a implementação de um simulador para o Jogo da Vida, focando em demonstrar como suas regras locais determinísticas dão origem a um ecossistema de padrões globais emergentes e fascinantes.

## 2. Métodos

O simulador foi desenvolvido em Python, com a biblioteca **NumPy** sendo essencial para a representação e manipulação eficiente da grade, e **Matplotlib** para a visualização e animação dos resultados.

### 2.1. Definição do Autômato Celular

O sistema é formalmente um Autômato Celular definido por:

- **Grade:** Uma matriz bidimensional de  $N \times M$  células.
- **Estados:** Cada célula pode estar no estado 1 (viva) ou 0 (morta).
- **Vizinhança:** A vizinhança de cada célula é a Vizinhança de Moore, composta pelas oito células adjacentes (horizontal, vertical e diagonal).
- **Regras de Transição:** O estado de uma célula no tempo  $t+1$  é determinado pelo seu próprio estado e pela soma de seus vizinhos vivos no tempo  $t$ .

## 2.2. As Regras do Jogo da Vida

A evolução do sistema é governada por quatro regras simples:

1. **Subpopulação:** Uma célula viva com menos de dois vizinhos vivos morre (como se por isolamento).
2. **Sobrevivência:** Uma célula viva com dois ou três vizinhos vivos sobrevive para a próxima geração.
3. **Superpopulação:** Uma célula viva com mais de três vizinhos vivos morre (como se por superpopulação).
4. **Nascimento:** Uma célula morta com exatamente três vizinhos vivos torna-se uma célula viva (como se por reprodução).

Essas regras são aplicadas simultaneamente a todas as células da grade para calcular o estado da próxima geração.

## 2.3. Implementação e Padrões Iniciais

A grade é representada por uma matriz NumPy. O cálculo do número de vizinhos vivos para todas as células de uma vez é realizado de forma eficiente usando uma série de operações `roll` para deslocamento da matriz, o que evita loops `for` aninhados e torna a simulação muito rápida. Para demonstrar a riqueza do sistema, foram implementadas funções para gerar padrões iniciais clássicos, incluindo a "Gosper Glider Gun" e o "Pulsar".

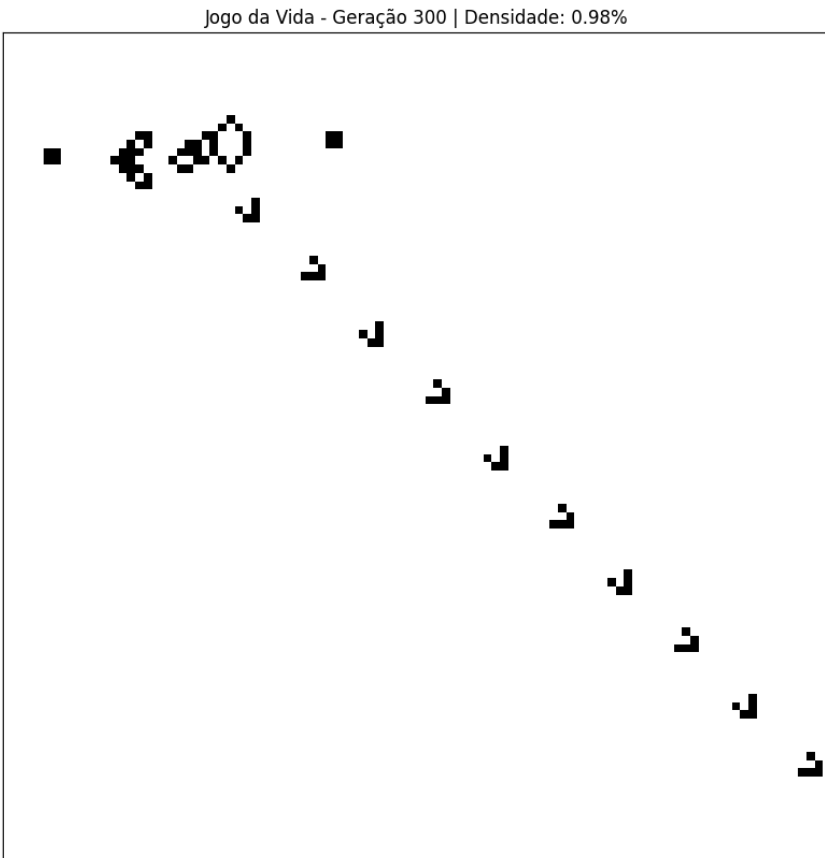
## 2.4. Disponibilidade do Código

O código-fonte completo da simulação está disponível no seguinte repositório GitHub para consulta e execução: [https://github.com/karinevitoria/Automata\\_cellular](https://github.com/karinevitoria/Automata_cellular)

## 3. Resultados

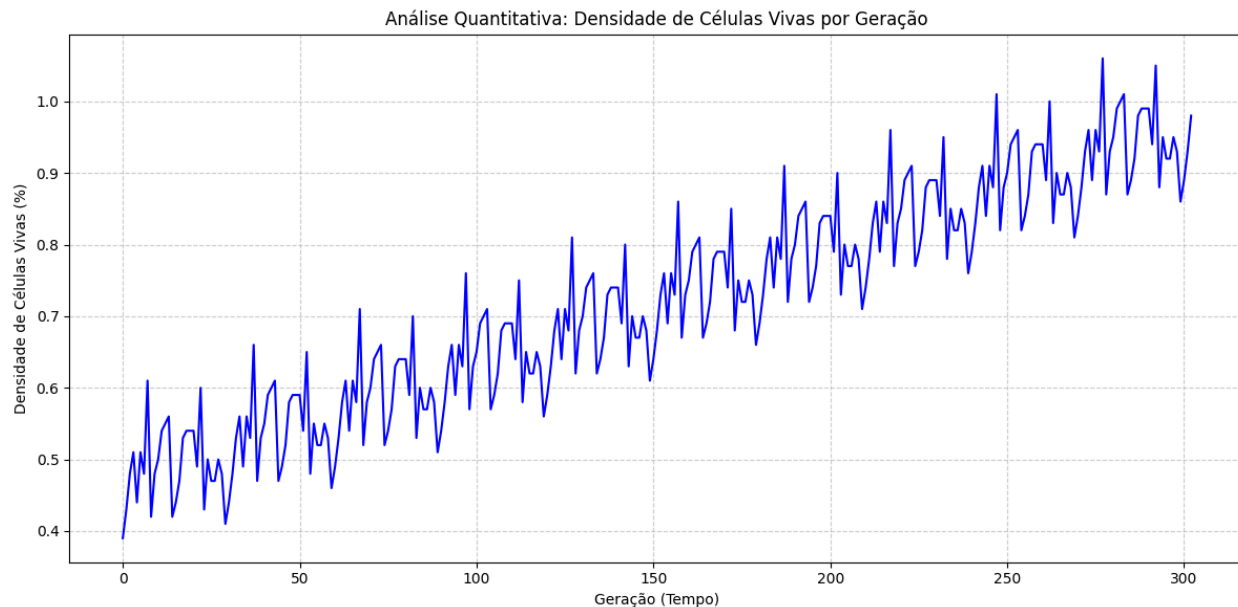
A execução da simulação a partir de diferentes condições iniciais revela uma "zoologia" de padrões emergentes. A Figura 1 exibe a evolução da "Gosper Glider Gun", um dos padrões mais famosos do Jogo da Vida.

**Figura 1: Evolução da Gosper Glider Gun.** A estrutura à esquerda emite periodicamente "gliders" (padrões móveis de 5 células) que viajam diagonalmente pela grade.



Além da análise qualitativa visual, foi realizada uma análise quantitativa da dinâmica do sistema. A Figura 2 mostra a evolução da densidade populacional (percentual de células vivas) ao longo de 300 gerações, partindo da "Gosper Glider Gun".

**Figura 2: Análise da Densidade Populacional por Geração.**



O gráfico da Figura 2 demonstra um comportamento complexo e periódico. As oscilações regulares na densidade são causadas diretamente pelo ciclo de operação da "arma", que constrói e dispara "gliders" em intervalos fixos, consumindo e liberando células no processo. Isso ilustra como o comportamento macroscópico (densidade total) está diretamente ligado à funcionalidade dos padrões microscópicos.

#### 4. Discussão e Conclusão

A implementação do Jogo da Vida serve como uma poderosa demonstração do conceito de **emergência**. Não há nada nas quatro regras que mencione "gliders" ou "armas". Esses comportamentos de alto nível são propriedades emergentes do sistema como um todo, surgindo unicamente das interações locais.

Este projeto ilustra com sucesso que um sistema determinístico com regras simples pode gerar um comportamento tão complexo que se torna, na prática, imprevisível a longo prazo, sendo necessário executar a simulação para saber o resultado. A adição de uma análise quantitativa, como o gráfico de densidade, enriquece o estudo, permitindo medir e caracterizar a dinâmica do sistema para além da simples observação visual.

Em conclusão, este trabalho não apenas implementa um simulador funcional para o Jogo da Vida de Conway, mas também serve como um laboratório prático para explorar os conceitos fundamentais da teoria dos autômatos celulares. Ele valida a premissa de que a complexidade não precisa ser projetada de cima para baixo; ela pode emergir de baixo para cima.

**Referências** [1] Gardner, M. (1970). Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'life'. *Scientific American*, 223(4), 120-123. [2] Berlekamp, E. R., Conway, J. H., & Guy, R. K. (2004). *Winning Ways for Your Mathematical Plays*. AK Peters/CRC Press.

