

Uma Extensão do Modelo de Chopard para Propagação de Incêndio Ambiental Baseado em Autômatos Celulares com Alto Desempenho

Karina da Silva Salles¹, Ueider Ferreira de Oliveira¹, Marilton Sanchotene de Aguiar²

¹Núcleo de Apoio a Projetos de Informática (NAPI)
Centro Politécnico (CPOLI)

Universidade Católica de Pelotas (UCPel)
Rua Félix da Cunha, 412. – 96010-000 – Pelotas – RS – Brazil

²Programa de Pós-Graduação em Informática (PPGInf)
Centro Politécnico (CPOLI)

Universidade Católica de Pelotas (UCPel)
Rua Félix da Cunha, 412. – 96010-000 – Pelotas – RS – Brazil

{karina, ueiderfdo, marilton}@ucpel.tche.br

Abstract. *This work proposes the extension of the dynamic model of Chopard [Chopard et al. 1998] based on a cellular automaton for the simulation of fire spreading in forests. More specifically, we are extending the model provided to attend conditions more detailed like the type of vegetation and other environmental aspects, such as water, roads and urban areas. The model of forest fire spreading in question is a probabilistic three-dimensional cellular automaton, whose cells may be one of the following states: i) buildings (urban area), ii) trees (forest area), iii) water; iv) road; v) ground and vi) fire. The evolution of the model is made in accordance with pre-defined rules, which are applied in parallel across the mesh so distributed.*

Keywords: *Cellular Automata, Forest Fire Spreading, High Performance Computing, Ecological Modelling.*

Resumo. *Este trabalho propõe a extensão do modelo dinâmico baseado em autômatos celulares para a simulação de incêndios em florestas de Chopard [Chopard et al. 1998]. Mais especificamente, buscou-se atender a condições mais detalhadas de tipo de vegetação e outros aspectos ambientais, como corpos d'água, estradas e áreas urbanas. O modelo de propagação de incêndio florestal em questão é um autômato celular probabilístico tridimensional, cujas células podem estar em um dos seguintes estados: i) casas (área urbana); ii) árvores (área florestal); iii) água; iv) estrada; v) solo exposto e vi) fogo (incêndio). A evolução do modelo é feita de acordo com regras pré-definidas, que são aplicadas paralelamente em toda a malha de modo distribuído.*

Palavras-chave: *Autômato Celular, Propagação de Incêndios Florestais, Computação de Alto Desempenho, Modelação Ecológica.*

1. Introdução

Os autômatos celulares são modelos matemáticos simples de sistemas naturais. Eles são constituídos de uma malha, ou reticulado, de células idênticas e discretas, onde cada

célula tem seu valor sobre um conjunto finito. Os valores evoluem, em passos de tempo discretos, de acordo com regras determinísticas que especificam os valores de cada célula em termos dos valores das células vizinhas.

Segundo Stephen Wolfram em [Wolfram 1994], os autômatos celulares podem ser considerados como idealizações discretas das equações diferenciais parciais frequentemente utilizadas para descrever sistemas naturais. Essa natureza discreta também permite a analogia com computadores digitais, pois os Autômatos Celulares podem ser vistos como computadores de processamento paralelo de construção simplificada.

O conceito original de Autômato Celular está fortemente associado ao grande cientista e matemático John Von Neumann [von Neumann 1966]. Von Neumann estava interessado nas conexões entre biologia e a então nova ciência dos dispositivos computacionais chamada de Teoria dos Autômatos. Nos seus estudos, predominava a idéia do fenômeno biológico da auto-reprodução. A questão era: “Que tipo de organização lógica é suficiente para um autômato ser capaz de reproduzir a si próprio?”.

Von Neumann acreditava que uma teoria geral de computação em redes complexas de autômatos seria essencial para o entendimento de sistemas complexos da natureza e, também, para o desenvolvimento de sistemas artificiais complexos.

O autômato está embutido sobre um espaço celular bidimensional com regra de transição e configuração de estados iniciais particulares, o espaço bidimensional é considerado infinito, mas as células, em quantidade finita, iniciam em um estado especial de repouso.

A vizinhança de cada célula pode consistir: i) de 5 células: ela mesma e as quatro vizinhas acima, abaixo, à esquerda e à direita, esta vizinhança bidimensional é chamada de **vizinhança de Von Neumann**, (Fig. 1(a)); e, ii) de 9 células: a vizinhança de Von Neumann mais as células nas diagonais, é chamada de **vizinhança de Moore**, (Fig. 1(b)).

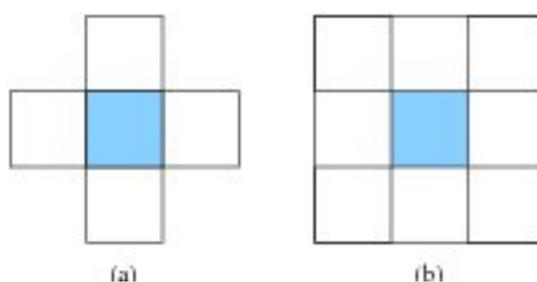


Figura 1. Tipos de vizinhanças, onde r é o raio da vizinhança

A máquina de Von Neumann é capaz de ir mais além do que a auto-reprodução, ela é um construtor universal, capaz de construir qualquer autômato cuja descrição está na sua fita, e ainda também capaz de computação universal.

Por isso, a auto-reprodução reduz-se a um caso particular onde a fita contém a descrição da própria máquina. Inicialmente, é essencial que o autômato construído esteja desativado, ou seja, seu estado não se modifica antes de receber o sinal de inicialização.

2. Modelos de Autômatos Celulares de Wolfram e de Conway

Como exemplo de autômato celular, considera-se uma linha (vetor) de células com valores 0 ou 1, mostrado na Figura 2. O valor de uma célula na posição i no tempo t é $a_i^{(t)}$. Uma regra muito simples para a evolução no tempo dos valores das células é:

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

onde $\pmod{2}$ indica que é tomado o resto 0 ou 1 da divisão por 2. De acordo com esta regra, o valor de uma célula em particular é dada pela soma módulo 2 (ou, equivalentemente ao *ou exclusivo* da álgebra Booleana) dos valores de suas células vizinhas à esquerda e à direita no passo de tempo anterior.

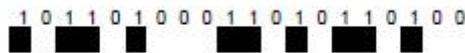


Figura 2. Esquema típico de um Autômato Celular

A Figura 3 mostra o padrão gerado pela evolução após 500 passos de tempo utilizando a regra acima a partir de uma semente consistindo de apenas uma célula com o valor 1 e todas as demais com o valor 0.

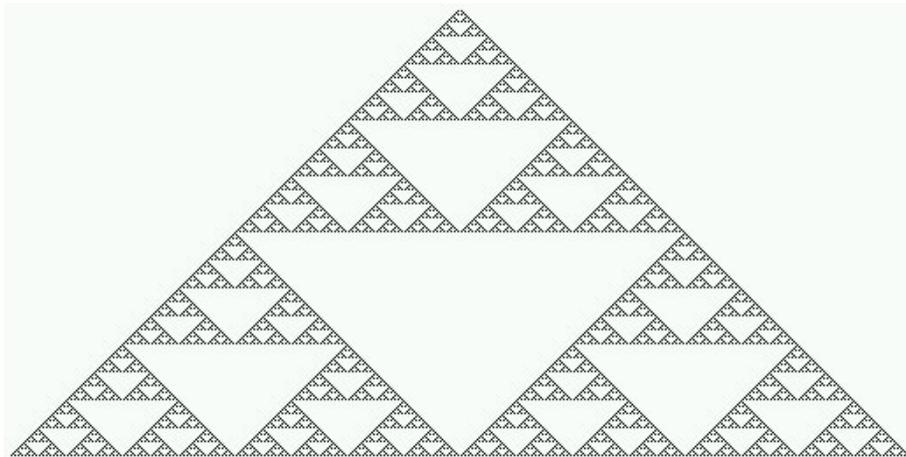


Figura 3. Evolução após 500 passos

Uma abordagem diferente é utilizada para mostrar computação universal em autômatos celulares, através do Jogo da Vida (*The Game of Life*). Este autômato celular foi inventado por John Conway na década de 1960 e sua definição e universalidade é demonstrada em [Berlekamp et al. 1982].

Sua evolução é determinada pelo seu estado inicial, não necessitando de nenhuma entrada de jogadores humanos. Ele é jogado em um conjunto de células quadradas que seguem ao infinito em todas as direções. Cada célula tem oito vizinhos (vizinhança de Moore). Cada célula pode estar em dois estados: “viva” ou “morta”. O estado do tabuleiro evolui e se modifica em pequenas passagens de tempo. Os estado de todas as células em um instante são considerados para calcular o estado de todas as células no instante seguinte. As transições dependem apenas do número de vizinhos vivos.

A regra de transição é simples: i) se $a_i^t = 1$, $a_i^{t+1} = 1$ se, e somente se, dois ou três vizinhos têm valor 1, caso contrário $a_i^{t+1} = 0$; e, ii) se $a_i^t = 0$, $a_i^{t+1} = 1$ se, e somente se, três vizinhos têm valor 1, caso contrário $a_i^{t+1} = 0$.

Na Figura 4 podem ser observadas as aplicações das regras de transições apresentadas acima.

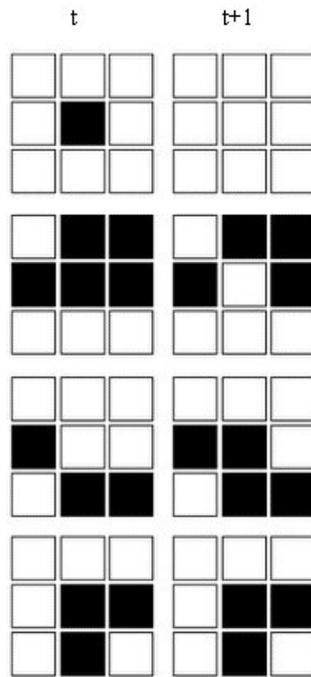


Figura 4. Aplicação das regras de transições

3. Extensão do Modelo de Propagação de Incêndio

O presente trabalho é uma extensão do modelo dinâmico baseado em autômatos celulares para a simulação de incêndios em florestas (*Forest Fire Model*), como o modelo de Chopard [Chopard et al. 1998]. Além disso, propõe-se um autômato celular probabilístico tridimensional, que simula incêndios em áreas florestais e urbanas, utilizando-se a **vizinhança de Moore**.

Originalmente, o modelo de propagação de incêndio em florestas seguia um autômato celular probabilístico cujas regras simulavam incêndio e crescimento da vegetação. As regras eram as seguintes: i) uma árvore em chama, torna-se uma célula vazia (solo exposto); ii) uma árvore torna-se uma árvore em chama se pelo menos uma das suas vizinhas mais próximas está em chama; iii) uma árvore cresce com probabilidade p em uma célula vazia; e, iv) uma árvore sem uma vizinha próxima em chamas torna-se uma árvore em chamas com probabilidade f (combustão espontânea).

Nesta proposta, o estados que cada célula pode atingir compreendem: i) casa (área urbana); ii) árvore (área florestal); iii) água; iv) estrada; v) solo exposto e vi) fogo (incêndio). Para fins de experimentação do modelo, o estado inicial escolhido para o autômato é definido a partir de uma situação sintética. Definiu-se uma “estrada” fixada

na malha do autômato. Além disso, definiu-se um “lago” em um dos lados do autômato e as demais células são preenchidas aleatoriamente, podendo ser: casa, árvore ou solo.

O autômato evolui, ou seja, os estados das células são alterados conforme o estado de suas células vizinhas, de acordo com as seguintes regras: i) uma célula de estado água ou estrada não é alterada (inicialmente o modelo não está tratando mudança de volume de corpos d’água e construção de novas estradas/vias); ii) uma célula de estado casa ou árvore, com vizinha de estado fogo, transforma-se em célula de estado fogo; iii) uma célula de estado solo, transforma-se em árvore, se na sua vizinhança houver mais células de estado árvore, ou transforma-se em casa, se na sua vizinhança houver mais células de estado casa; iv) uma célula de estado fogo permanece fogo, por um espaço de tempo t , depois transforma-se em solo; v) nas células cujos estados árvore e solo há uma probabilidade p_{urb} deles tornarem-se casa; vi) nos estados casa e árvore há uma probabilidade p_{inc} de tornarem-se fogo; e, vii) no estado solo há a probabilidade p_{cresc} de tornar-se árvore.

A linguagem de programação C++ foi utilizada para a implementação do ambiente de simulação, de modo orientado a objetos. Juntamente com o ambiente de simulação foi desenvolvido um ambiente de visualização 3D para uma melhor interpretação dos estados das células. Esse ambiente foi desenvolvido utilizando a API OpenGL.

A Figura 5 mostra a representação gráfica de cada estado admissível no modelo e a Figura 6 mostra a visualização do estado inicial hipotético no simulador.

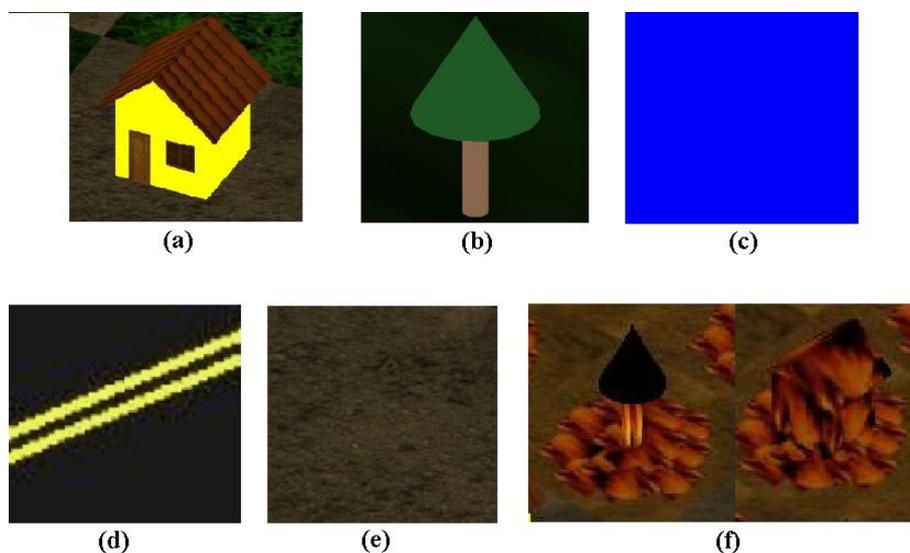


Figura 5. (a) casa; (b) árvore; (c) água; (d) estrada; (e) solo e (f) fogo

Optou-se pela biblioteca OpenGL por ser uma especificação aberta e multiplataforma de uma biblioteca de rotinas gráficas e de modelagem, bidimensional e tridimensional. Considera-se extremamente portátil e rápida e é utilizada para o desenvolvimento de aplicações de Computação Gráfica [Cohen and Manssour 2006].

As regras que permitem a evolução do modelo de autômato celular são aplicadas paralelamente em toda a malha de modo distribuído com a utilização de trocas de mensagens, possibilitando um alto desempenho no modelo. Neste trabalho, utilizou-se

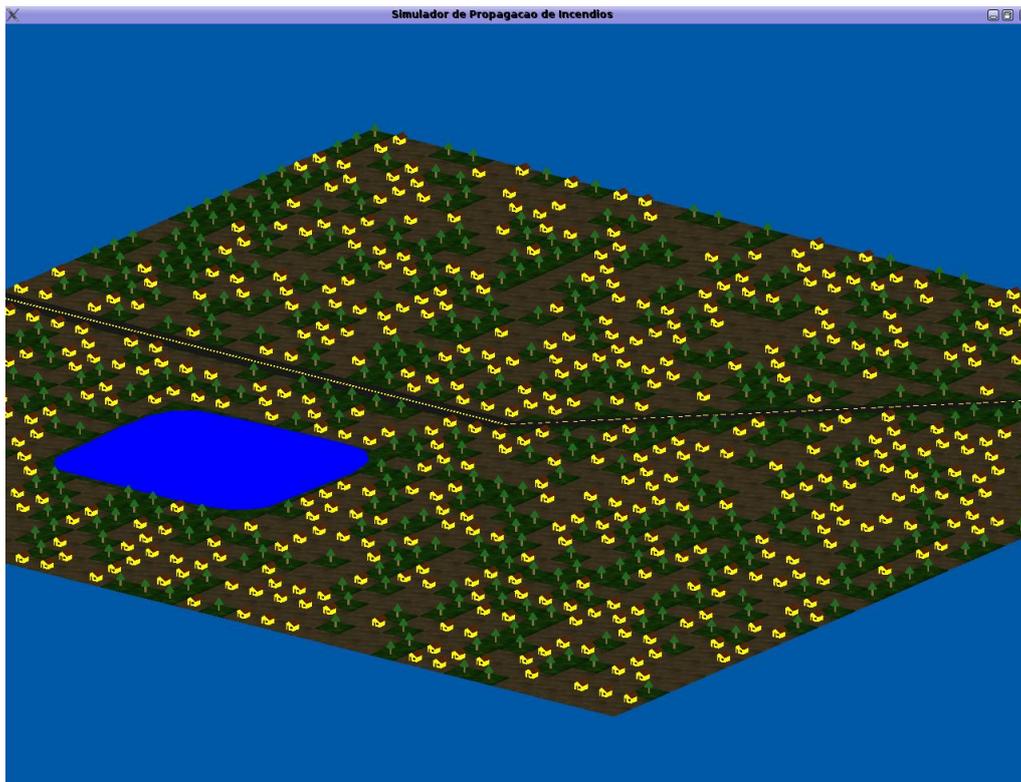


Figura 6. Estado Inicial

a biblioteca de interface de mensagens chamada MPI [Gropp et al. 1999], desenvolvida para ser padrão em ambientes de memória distribuída e é portátil para qualquer arquitetura. A plataforma alvo deste trabalho são ambientes de memória distribuída e agregados de computadores.

O simulador segue o modelo mestre/escravo onde: (i) a malha é dividida em pequenas partes e essas partes são distribuídas para que outras máquinas do cluster apliquem as regras do modelo na malha recebida; (ii) as malhas atualizadas em cada máquina escrava são enviadas ao *frontend* que as coleta, recompõe e apresenta a evolução resultante.

4. Considerações Finais

Este trabalho é uma proposta de extensão do modelo dinâmico baseado em autômatos celulares para a simulação de incêndios em florestas de Chopard [Chopard et al. 1998]. Mais especificamente, buscou-se a extensão desde modelo para atender a condições mais detalhadas de tipo de vegetação e outros aspectos ambientais, como corpos d'água, estradas e áreas urbanas, que não estavam presentes no modelo de Chopard.

O modelo de propagação de incêndio florestal está definido por um autômato celular probabilístico tridimensional síncrono, e por essas características, é razoável imaginar o modelo como um programa paralelo e distribuído. Os resultados de simulações alcançados neste projeto permitem concluir que modelos como o proposto, além de serem mais concretos e simplificados, apresentam resultados compatíveis com os modelos matemáticos analíticos, que necessitam de muita computação e, por isso, exigem muito mais recursos computacionais.

Pretende-se futuramente fazer simulações mais realistas partindo de informações geográficas referenciadas e planos de informações obtidos a partir de sistemas de informações geográficas.

Referências

- Berlekamp, E. R., Conway, J. H., and Guy, R. K. (1982). *Winning Ways for your Mathematical Plays*, volume 2. Academic Press.
- Chopard, B., Luthi, P., and Masselot, R. (1998). Cellular automata and lattice boltzmann techniques: An approach to model and simulate complex systems. In *Advances in Physics*.
- Cohen, M. and Manssour, I. H. (2006). *OpenGL Uma Abordagem Prática e Objetiva*. Novatec Editora.
- Gropp, W., Lusk, E., and Skjellum, A. (1999). *Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message-Passing Interface*. The MIT Press, Cambridge, MA, second edition.
- von Neumann, J. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Urbana, Illinois. Edited and completed by Arthur W. Burks.
- Wolfram, S. (1994). *Cellular Automata and Complexity: Collected Papers*. Addison-Wesley.