

Simulação baseada em autômatos celulares para a evacuação emergencial de pedestres em ambientes com geometria complexa

André P. de Castro¹, Danielli A. Lima¹

¹Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) – Campus Avançado Patrocínio
Av. Lúcia Terezinha Lassi Capuano nº 255 – 38.740-000 – Patrocínio – MG – Brazil

Abstract. *The security in buildings environments is an important aspect, especially in areas where permanence and movement of individuals are intense. If a host fails to escape in time to a place of risk, by choosing a wrong way or a bad way out, there is always the imminence of injury and even death. Computer-based simulations are important in determining the reliability and safety of a structural model. The use of cellular automata has proven useful in computer simulation, especially by the parallelism inherent in them. The main objective of the research was to propose a simulation model for emergency evacuation based on the theory of cellular automata adapted from a precursor model.*

Resumo. *A segurança em ambientes de edificações é um aspecto importante, principalmente em áreas em que a permanência e a circulação de indivíduos são intensas. Caso uma multidão falhe ao escapar em tempo de um local de risco, pela escolha de um caminho errado ou de uma saída ruim, há sempre a iminência de lesões e até mesmo de morte. Simulações geradas por computador são importantes para a determinação da confiabilidade e segurança de um modelo estrutural. O uso de autômatos celulares tem se mostrado útil na simulação computacional, principalmente pelo paralelismo inerente dos mesmos. O principal objetivo da pesquisa foi a proposição de um modelo de simulação da evacuação emergencial baseada na teoria de autômatos celulares adaptado de um modelo precursor.*

1. Introdução

A natureza humana manifesta a característica de interagir em sociedade, formando aglomerações para propósitos gerais. Rotinas de segurança devem garantir a integridade física de cada indivíduo dentro de estruturas prediais, onde a formação de multidões pode ocorrer devido a fatores desencadeadores de pânico como, por exemplo, incêndios, conflitos e até mesmo atentados terroristas.

Simulações de evacuações emergenciais, baseadas em sistemas computacionais, influenciam na execução de um plano de segurança predial [Burstedde et al. 2001]. As simulações são estruturadas a partir de abstrações de realidades descritas e o estudo delas geram resultados que, quando comparados, delimitam medidas que servem como base para o nivelamento de segurança de uma estrutura [Perez et al. 2002]. A evacuação sob condições físicas e temporais é relevante, visto que, se um indivíduo ou multidão cometem falhas ao tentar escapar em uma situação de pânico, seja por encontrarem obstáculos em sua trajetória, saídas mal elaboradas ou caminhos incorretos; tendem ao envolvimento

de risco a morte. Em caso de empecilhos na saída predial, lesões podem ocorrer, resultantes de conflitos, pisoteamentos e em casos mais graves a morte de pessoas.

Uma ferramenta útil na elaboração de simulações gerenciadas por computador são estabelecidas por modelos matemáticos conhecidos como Autômatos Celulares (ACs). Existem diversas aplicações no uso de autômatos celulares, dentre elas, podemos citar a modelagem de fenômenos naturais, físicos ou biológicos, que seriam muito difíceis de serem modelados pelas equações diferenciais, sendo estas as mais utilizadas nesse tipo de tarefa. Além disso, os ACs possuem alto nível de paralelismo, quando implementados em um hardware paralelo [Oliveira 2003].

2. Objetivo

Este trabalho tem por objetivo a proposição de um modelo de evacuação com alterações lógicas de implementação do cálculo de movimentação de pedestres utilizando-se autômatos celulares bidimensionais. As características principais do modelo bidimensional proposto por [Varas et al. 2007] serão preservadas. A fim de avaliar o modelo sugerido, testes em diferentes situações foram realizados. As simulações fornecem o tempo de evacuação total de uma quantidade de pessoas e a partir de várias simulações é possível obter a média geral do tempo de evacuação.

3. Fundamentação teórica e trabalhos relacionados

3.1. Autômatos celulares

Um AC é composto por um reticulado com uma dimensão d dividido em células ou unidades processadoras, sendo que, cada célula C é representada por um estado. As células modificam seus estados a cada passo de iteração de acordo com uma regra de transição. Podemos aplicar a regra de transição por T passos de tempo para obter a evolução espaço-temporal do reticulado do AC. A regra estabelecida por uma função de transição indica o novo símbolo a ser escrito na célula do reticulado de acordo com seu estado atual e dos estados de suas vizinhas (regra local). Em sua definição mais usual, a atualização dos estados se dá de forma síncrona e utiliza uma regra determinística, isto é, a cada passo de tempo todas as N células do reticulado são atualizadas. No modelo proposto neste trabalho, o sistema de regras é probabilístico, ou seja, é possível alterar o estado de uma célula a partir de uma função de probabilidade, isso significa que as regras de atualização são probabilísticas e, portanto, o estado de uma célula em um determinado instante depende probabilisticamente dos estados de suas células vizinhas no passo de tempo imediatamente anterior [Lima 2010].

A estruturação de um AC unidimensional (1D) é a forma mais estudada. A mudança de estado de uma célula depende de m vizinhas expressas por $m = (2r + 1)$, sendo r o raio do AC [Oliveira 2003]. Para ilustrar um AC unidimensional considere a Figura 1 (a), que aborda uma modelagem conhecida como regra 30 [Wolfram 2002], contendo um reticulado de 6 células sendo que o estado inicial de cada célula é apresentado em $t = 0$. Uma regra binária de raio 1 é aplicada, sendo que a vizinhança de cada célula é formada por três elementos: a própria célula e suas duas vizinhas adjacentes (à esquerda e à direita). Como esse AC é binário (2 estados possíveis), existem 8 diferentes vizinhanças, da 000 a 111. A regra em si é dada pelos 8 bits de saída associados a cada vizinhança possível: 01111000. Na Figura 1 (b) vemos a atualização do reticulado de $N = 6$ por 2 passos de tempo a partir de sua configuração inicial 101110 em $t = 0$. A

cada passo, cada célula do reticulado é atualizada identificando-se sua vizinhança e seu novo estado é dado pelo bit de saída correspondente na regra de transição. Observe como exemplo, a célula de símbolo 1, destacada em $t = 0$, seu próximo estado será 0 em $t = 1$. O reticulado é submetido a condições periódicas de contorno, sendo que a primeira célula é vizinha imediata da última, e vice-versa. Aplicando-se esse procedimento para todas as células do reticulado de forma síncrona, tem-se a nova configuração do reticulado a cada passo de tempo.

Os ACs fundamentados em duas dimensões (2D) são amplamente conhecidos na literatura. ACs bidimensionais também são muito usados para a representação de padrões gráficos, já que sua execução assemelha-se a uma imagem pixelizada. Essa dimensão contempla variadas formas para a consideração da vizinhança de uma célula, sendo que as duas principais estão apresentadas na Figura 1 (c) e (d), tal que o símbolo \odot representa a célula alvo e o símbolo \blacksquare identifica a célula vizinha. Dentre as aplicações de ACs bidimensionais, o modelo mais conhecido é o jogo matemático proposto por [Conway 1970] denominado *Game of Life*.

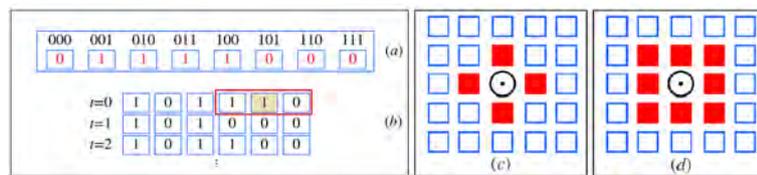


Figura 1. (a) Regra de transição de raio 1. (b) Evolução do AC por T=2 passos de tempo. (c) Vizinhança de Von Neumann. (d) Vizinhança de Moore.

3.2. Modelos para evacuação baseados em ACs

Diversos autores apresentaram abordagens de como utilizar ACs para simular ambientes de evacuação de multidões, descrevendo modos de controle do trânsito dos indivíduos e como fatores externos afetam a evacuação. O modelo proposto neste trabalho é fortemente baseado no modelo proposto em [Varas et al. 2007] e [Carneiro 2012]. Os modelos consistem de duas etapas: a primeira etapa, um campo de piso (malha) é demarcado para representar a planta de uma estrutura. A segunda etapa apresenta um conjunto de regras de transição que permitem o deslocamento dos pedestres sobre essa malha. Para isso [Varas et al. 2007] elaborou um modelo de AC bidimensional para simular o processo de evacuação dos pedestres em uma estrutura cujos obstáculos são fixos e estão bem visíveis para os indivíduos que ali se encontram. O campo de piso de uma estrutura é formatado seguindo o conceito de que a partir de qualquer célula é possível seguir o menor caminho até a saída mais próxima. Para simular o comportamento dos pedestres durante a evacuação, em ambos os modelos um fator de pânico foi introduzido, responsável por evitar a movimentação de uma porcentagem de pedestres no ambiente. Segundo [Varas et al. 2007], quando um pedestre deseja se movimentar para uma célula já ocupada, um conflito deve ser resolvido, conforme exemplificado na Figura 2. Por outro lado, em [Carneiro 2012] os pedestres podem seguir rotas alternativas caso uma determinada célula esteja ocupada.

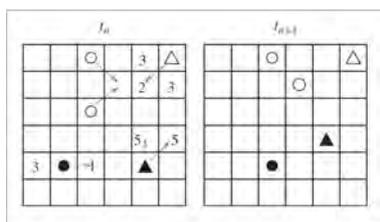


Figura 2. Movimentos possíveis para os pedestres no modelo de [Varas et al. 2007]. O números correspondem ao valor do campo de piso em uma célula, os arcos representam as intenções de movimento, e os símbolos representam os pedestres em várias situações. Círculo preenchido: o pedestre movimentar-se para uma célula adjacente para minimizar o seu campo de piso. Círculos abertos: dois pedestres tentam se movimentar para a mesma célula; um número randômico decide quem se movimenta. Triângulo preenchido: duas células adjacentes com o mesmo campo de piso, os pedestres decidem randomicamente para onde mover. Triângulo aberto: pedestres em pânico, não se movimentam.

4. Modelo proposto

O modelo proposto é fortemente baseado nos modelos de [Varas et al. 2007] e [Carneiro 2012] e consiste de duas etapas: a primeira etapa é a criação de um campo de piso, onde cada célula desse piso consiste de um valor inteiro e positivo que guia a escolha do pedestre no momento de fuga. A segunda etapa baseia-se utilização de regras que permitem a movimentação dos pedestres de forma segura.

4.1. Campo de piso

Inicialmente, a representação da estrutura predial 3D é transformada para uma estrutura 2D, conforme é observado na Figura 3 (a). Posteriormente, é realizada uma atribuição com valores inteiros em cada célula de piso da estrutura que será simulada. A atribuição dos pesos das células do reticulado segue o algoritmo proposto por [Varas et al. 2007], com a adição do valor da célula adjacente +1.0 para horizontal ou vertical e +1.5 para as células na diagonal. Um exemplo do campo de piso adotado no modelo é apresentado na Figura 3 (c) e (d).

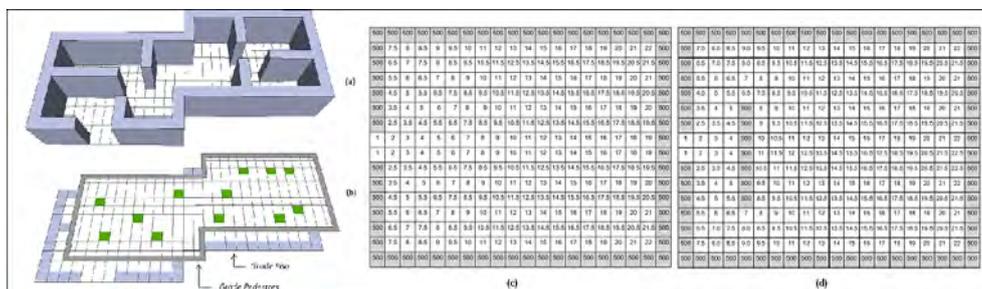


Figura 3. (a) Estrutura predial 3D. (b) Transformação da estrutura 3D para campo de piso 2D e pontos verdes representam os pedestres. (c) Campo de piso com 18 × 14 células utilizado no modelo [Varas et al. 2007]. A porta de saída está do lado esquerdo (células com valores igual a 1); as células correspondentes às paredes são atribuídos valores de 500. (d) Campo de piso de 18 × 14 células e um obstáculo na parte central.

4.2. Movimentação de pedestres

Posteriormente uma nova grade com pedestres alocados é considerada no modelo, conforme é mostrado na Figura 3 (b). A alocação inicial desses pedestres não pode sobrepor os obstáculos. Por fim, uma regra que guia a movimentação dos indivíduos na estrutura deve ser elaborada. A regra de movimentação dos pedestres é o principal aspecto que distingue o modelo proposto dos modelos precursores em [Varas et al. 2007] e [Carneiro 2012]. A técnica considerada neste trabalho é descrita a seguir:

A cada passo de tempo os indivíduos no reticulado de pedestres escolhem seu caminho e avançam em direção a saídas. Para a escolha de rota o pedestre sempre tenta ir em direção a porta mais próxima, tendo como alvo a célula adjacente com menor valor de piso.

1. Para o cálculo da rota, um indivíduo do reticulado observa se sua célula alvo está desocupada, caso esteja ele opta por esperar que ela seja desocupada ou avança para a célula adjacente a da célula alvo. Com isso, o caminho de todos os pedestres é calculado.
2. Tentativas para que os pedestres possam avançar sobre o reticulado são realizadas. Todas as células são observadas e seu endereço é comparado com as rotas calculadas.
 - (a) Se uma rota corresponde ao valor da célula em observação, verifica-se a vizinhança para a constatação de novos candidatos.
 - (b) Se não há mais candidatos o pedestre é movido.
 - (c) Caso o número de candidatos, a ocupar a célula alvo, seja maior que “1”; a disputa é decidida lançando-se um número aleatório, e o candidato vencedor tem direito de mover-se para a célula pretendida e o perdedor recalcula sua rota.
3. Se um indivíduo alcança a porta, ele é eliminado para não impedir os demais de evacuarem.
4. Os passos (1), (2) e (3) são refeitos até que todos os pedestres sejam movidos.

As principais diferenças dos modelos é definida a seguir: no modelo de [Varas et al. 2007] o pedestre que não se movimentou só prosseguiria no próximo passo de tempo Figura 4 (a). No modelo em [Carneiro 2012] o pedestre obrigatoriamente se moveria para a célula com menor valor adjacente da célula anteriormente escolhida Figura 4 (b). Considerando-se a fusão das técnicas propostas nesses dois modelos, o delineamento do modelo apresentado nesse trabalho, estabelece que o pedestre poderá aguardar que sua célula desejada seja liberada com a movimentação do pedestre que a ocupa, ou escolher outra célula para a realização do movimento Figura 4 (c).

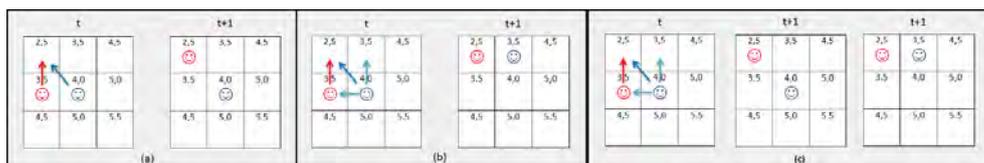


Figura 4. Movimentação de dois pedestres em caso de conflito (a) Modelo de [Varas et al. 2007] (b) Modelo de [Carneiro 2012] (c) Modelo proposto.

5. Resultados experimentais

Inicialmente foram realizados alguns testes para a verificação de formação de padrões durante a evacuação que ocorrem no modelo proposto. O principal comportamento observado, e que distingue o modelo apresentado dos demais já relatados na literatura de ACs, é a tendência da formação de filas, resultante das adaptações lógicas do modelo precursor, ou seja, os grupos de indivíduos tendem a deslocar-se ordenadamente em direção às saídas.

A técnica proposta também foi testada em uma estrutura complexa (com obstáculos) similar a uma estrutura real. O novo experimento levou em consideração, locais aleatórios para a inserção dos pedestres. Para os pedestres, 130 células foram reservadas para cada simulação. A planta da área estudada pode ser vista na Figura 5.

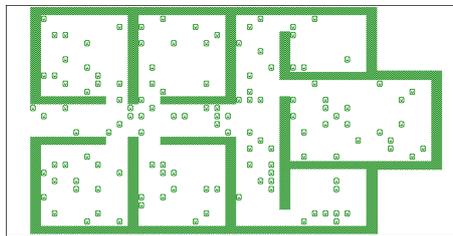


Figura 5. Estrutura complexa simulada a partir de 130 indivíduos gerados aleatoriamente.

O histograma da Figura 6 aponta os dados obtidos com a simulação da planta da Figura 5 a partir de 100 execuções. As classes de intervalos no gráfico representam as quantidades de iterações necessárias para que todos os pedestres pudessem evacuar da estrutura complexa. Dessa forma, pode-se perceber que o modelo de movimentação é bastante eficiente no que diz respeito à distribuição de quantidades de passos de evacuação, uma vez que, o histograma apresenta uma distribuição próxima à normal. Isso significa que os valores obtidos não sofreram grande variação em relação à média ($\bar{X} = 150$ passos). Assim, os resultados gerados pelo modelo foram convergentes para um valor fixo. Considerando-se o tempo de passo 0,4s proposto em [Varas et al. 2007], então o tempo de evacuação médio foi cerca de 60 segundos. Esse tempo é perfeitamente aceitável, embora o local mais distante da estrutura esteja localizado cerca de 20m da saída todos os corredores são traçados com ângulos retos e as barreiras são ortogonais, diminuindo o tempo de evacuação.

Posteriormente, mais experimentos a fim de definir a posição estratégica das portas de saída foram realizados. Para isso, foram adotadas as mesmas características de ambiente testadas por [Varas et al. 2007]. Para facilitar a análise, apenas as estruturas complexas foram utilizadas, como a exibida na Figura 7 (a), ocupada por 50 indivíduos. Além disso, as portas foram inicialmente rotuladas e foram alternadas a cada bloco de testes. Nesse caso, as portas são consideradas separadamente e somente um indivíduo pode retirar-se da sala em um determinado passo de tempo, ou seja, a saída só é permitida por uma única pessoa. Para a análise do local mais indicado para as saídas é observado o rótulo de saída que possui a menor quantidade de iterações. No total, 10 simulações são realizadas, para cada uma das 30 posições “diferentes” das saídas indicadas Figura 7(a). Os resultados observados em [Varas et al. 2007] resultou em médias que variam de 98 a

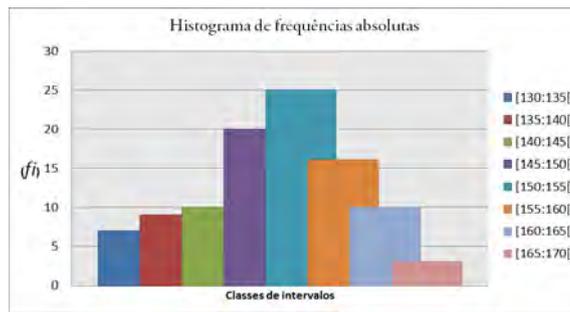


Figura 6. Histograma que representa as frequências de dados obtidas para cada classe (quantidade de passos necessários para a evacuação).

106 passos de tempo para cada porta alternada na mesma estrutura, conforme o gráfico da Figura 8(a). Realizando os testes em estruturas complexas, algumas diferenças surgiram entre os dois modelos. Nesse caso, notou-se que a evacuação é realizada mais rapidamente e as médias variam de 52, 1 a 95 passos de tempo para cada porta modificada, por outro lado, a melhor rota de fuga está próximo à saída 30, conforme também foi observado no modelo de [Varas et al. 2007]. O tempo de evacuação no modelo proposto está abaixo dos valores obtidos por [Varas et al. 2007] e pode ser explicado devido ao fato de que no modelo precursor, apenas um pedestre se movia em caso de conflito de células e o outro ficava paralisado. No modelo aqui descrito, esse pedestre pode escolher uma rota alternativa, além disso, o caso de pânico não foi considerado neste trabalho.

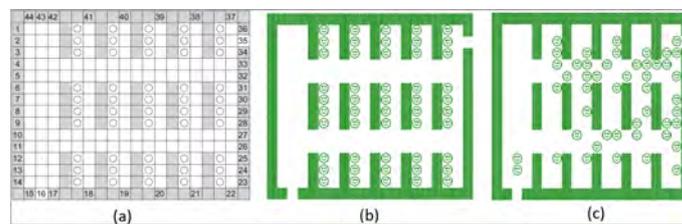


Figura 7. Estrutura: (a) [Varas et al. 2007], (b) geometria aplicada ao modelo proposto e em (c) modelo proposto após 15 iterações.

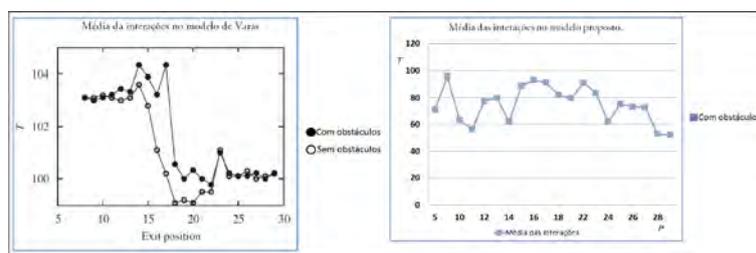


Figura 8. (a) Modelo em [Varas et al. 2007] média das iterações(T) em função da localização da porta na estrutura. (b) Resultados dos testes obtidos com o modelo proposto considerando apenas as estruturas complexas, ou seja, salas com obstáculos.

6. Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi investigado um modelo de autômatos celulares bidimensionais fundamentado em modelos precursores aplicados a simulação de evacuação emergencial para

ambientes complexos. Para a modelagem do AC detalhado no trabalho, considerou-se a implementação descrita por [Varas et al. 2007] e as complementações idealizadas por [Carneiro 2012]. Todas as adaptações lógicas foram concebidas com a análise desses modelos precursores. Além disso, uma análise das características do modelo desenvolvido foi abordada.

Com a execução do modelo descrito foi possível gerar dados visuais, onde os comportamentos de padrões sociais inseridos durante a evacuação puderam ser observados. Além disso, dados estatísticos foram obtidos relacionando a média das iterações com a quantidade de indivíduos alocados em uma estrutura. A grande vantagem de se usar o modelo desenvolvido, na simulação de evacuação emergencial, encontra-se no fato de que ocorre uma padronização das rotas de pedestres. Entretanto, não podemos garantir que apenas os comportamentos inseridos por si só já comprovam a segurança da estrutura predial gerada pelo modelo. Mas, elas iniciam uma análise que pode ser aprofundada em um trabalho de pesquisa posterior.

Como continuidade desse trabalho, seria interessante a adaptação do modelo 2D para um modelo 3D, no qual as alturas dos obstáculos poderiam ser avaliadas. Para alcançar o paralelismo do modelo poderia ser utilizada uma implementação em hardware paralelo, uma vez que toda a motivação para o emprego de ACs na simulação reside na possibilidade de implementação eficiente. Além disso, acredita-se que, o fato do modelo ser gerenciado por regras simples na função de transição, é possível a adição de novos parâmetros para que diferentes comportamentos sociais possam ser observados no decorrer de uma mesma simulação. Essa inserção visa o objetivo do alcance de uma maior fidelidade se comparado com uma situação real.

Referências

- Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., and Zittartz, J. (2001). *Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton.*, pages 507 – 525.
- Carneiro, L. O. (2012). Simulação de evacuação de multidão por autômato celular - estudo de caso em um estádio de futebol. Master's thesis, Universidade Federal do Ceará.
- Conway, J. H. (1970). Jogo da vida. *Scientific American*. Jogos matematicos.
- Lima, D. A. (2010). Modelos de criptografia baseados no cálculo de pré-imagem de autômatos celulares. *Trabalho de Conclusão de Curso em Ciência da Computação - Universidade Federal de Uberlândia*, pages 20 – 21.
- Oliveira, G. M. B. (2003). Automatos celulares: aspectos dinâmicos e computacionais. *III Jornada de Mini-cursos em Inteligência Artificial (MCIA) - Sociedade Brasileira de Computação*, 8:297 – 345.
- Perez, G., Tapang, G., Lim, M., and Saloma, C. (2002). *Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians.*, pages 609 – 618.
- Varas, A., Cornejo, M., Mainemer, D., Toledo, B., Rogan, J., Munoz, V., and Valdivia, J. (2007). Cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 382(2):631 – 642.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media - (1st edition): 1197 - 2006-09-19T07:35:05.000+0200.