

Composição com Autómatos Celulares

**Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Composição e Teoria Musical**

Orientador: Miguel Ribeiro-Pereira

Samuel Van Ransbeeck

2009



**Escola Superior de Música e das Artes do Espectáculo
Instituto Politécnico do Porto
Portugal**

Resumo

Os autômatos celulares são interessantes modelos teóricos para a modelagem de processos complexos, tornando-os mais fáceis de entender. Estes modelos têm sido utilizados em diversos ramos das ciências. Tal como outros modelos matemático-teóricos, os autômatos celulares têm potencial para ser utilizados em meios musicais. Esta Tese introduz o leitor, de forma abrangente, no universo dos autômatos celulares. Primeiramente, são explicadas as bases dos autômatos celulares, seguidas por exemplos de aplicações nas ciências. A segunda parte centra-se sobre as aplicações musicais de autômatos celulares, numa abordagem teórica, enquanto a terceira parte apresenta três casos de estudo que usam os processos teóricos definidos anteriormente.

Palavras-chave: composição algorítmica — autômatos celulares — *o Jogo da Vida*

Abstract

Cellular automata are interesting theoretical models for modelling complex processes to make them easier to understand. These models have been used in various branches of sciences. Just like other mathematical-theoretical models, cellular automata have a potential to be used for musical means. This thesis introduces the reader in a comprehensive way to the universe of cellular automata. First, the basics of cellular automata are explained, followed by examples of applications in the sciences. The second part focuses on the musical applications of cellular automata in a theoretical way, whereas the third part shows three case studies that use the processes set out in the previous part.

Keywords: algorithmic composition — cellular automata — *the Game of Life*

Currículo

Samuel Van Ransbeeck é um compositor belga que vive em Portugal desde setembro 2006. Após terminar os seus estudos em línguas latinas modernas, em 2002, passou a estudar teoria musical e composição no Lemmensinstituut em Leuven, na Bélgica. Teve aulas com Luc Van Hove (composição), Christian Vereecke (contraponto e harmonia) e Hans Mannes (violoncelo). A partir de Setembro de 2006 até fevereiro de 2007, passou a estudar na ESMAE no Porto, em Portugal, com uma bolsa Erasmus. Após completar a sua licenciatura na Bélgica, em Junho de 2007, voltou ao Porto para obter o mestrado em composição e teoria musical.

Actualmente matriculado na ESMAE no curso de composição e teoria musical, prossegue o seu mestrado e agora no seu último ano, com Fernando Lapa como professor de composição. Estudou composição com os professores Dimitris Andrikopoulos e Filipe Vieira. Na música electrónica, teve aulas com Rui Dias, Gustavo Costa e Carlos Guedes. O seu orientador para a tese de Mestrado é Miguel Ribeiro-Pereira. Para além destes docentes, esteve em master classes com Morton Subotnick, Klaas de Vries, Helmut Lachenmann, Magnus Lindberg, Jonathan Harvey, Pedro Rebelo, Mikka Laursson, Eduardo Soutullo e Bruce Pennycook.

Samuel Van Ransbeeck utiliza dados complexos como uma base para suas composições. Estes dados são complexas fórmulas estocásticas e conjuntos de dados aplicados a parâmetros musicais. O tema da sua tese de Mestrado é “Composição com autómatos celulares”, um projecto que inclui uma componente teórica e uma componente prática, sob a forma de composições delineadas na parte teórica.

Em 2008, desenvolveu o projecto *StockWatch*, um programa que extrai valores da bolsa e os transforma em música. O programa recebeu reacções positivas e ganhou aclamações críticas em todo o mundo. Utilizando este software *StockWatch*, compôs uma composição electrónica, *Um Só*, para que a artista visual franco-brasileira Camille Entratice criasse o videoclip. O vídeo foi exibido no Porto e seleccionado para o Streamingfestival, na Holanda.

Tem outros projectos, como *Dispersão*, uma instalação em colaboração do escultor polaco Piotr Nowak, para o qual Samuel Van Ransbeeck escreveu a música. O vídeo foi seleccionado pelo projecto CologneOFF e, posteriormente, exibido na parte de 24 horas de Nuremberg Film Festival, na Alemanha. Também foi mostrado no festival SoundImagesound VI, na Califórnia. Terminou em março 2009 a banda sonora de *The Shadow*, um filme de um estudante da Tuft University, em Massachusetts, E.U.A.

Desde Abril 2009 é colaborador da companhia das artes Australiana *TRAX*, com quem desenvolve projectos de arte. O *Outhouse* é um projecto interactivo, em que o público é convidado a entrevistar-se a si mesmo, numa forma confortável. O objectivo é coleccionar histórias pequenas, que fazem parte da comunidade. Este projecto está a ser mostrado na Austrália, em várias conferências. e no 'outback', com a comunidade de aborígenes. O *Outhouse* foi convidado para ser mostrado na Europa, no Festival Future Places, no Porto, onde lhe foi atribuído o primeiro prémio. Este prémio é uma residência de 3 meses em Lisboa. Para além disso, *TRAX* recebeu um convite para o South by Southwest Festival no Texas, E.U.A., em Março de 2010.

Desde Agosto 2009 é bolseiro na Unidade de Telecomunicações e Multimédia (UTM) do INESC Porto, no âmbito do projecto “Sistemas composicionais dinâmicos e adaptativos controlados por interfaces”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (UTAustin/CD/0052/2008, responsáveis: Carlos Guedes e Fabien Gouyon) em parceria com a Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade do Texas em Austin, YDreams e Casa da Música.

Certificado de Autoridade/Originalidade

Certifico que esta Tese não foi previamente submetida a um grau académico e nenhuma parte da mesma foi utilizada outrora para outros fins que não esta Tese.

Certifico igualmente que a Tese foi escrita por mim. Qualquer ajuda que recebi para o meu trabalho e para a preparação da Tese já foi reconhecida. Além disso, eu certifico que todas as fontes de informação e bibliografia utilizadas são indicadas na Tese.

Samuel Van Ransbeeck

Agradecimentos

Durante a pesquisa, tive o prazer de trabalhar com muitas pessoas interessantes. Esta Tese não seria possível sem o trabalho e a ajuda do meu orientador, Miguel Ribeiro-Pereira, que não só me ajudou na parte da escrita, como também no desenvolvimento dum pensamento lógico, aumentando o meu interesse na investigação científica. Quero agradecer também a Daniela Coimbra e a Fernando Lapa, pela revisão de algumas partes da Tese.

Em relação à componente prática, ou seja, à escrita das composições, quero agradecer aos meus professores de composição na ESMAE (por ordem cronológica): Dimitris Andrikopoulos, Filipe Vieira e Fernando Lapa. Também os professores de composição electro-acústica — Carlos Guedes, Rui Dias e Gustavo Costa — merecem palavras de agradecimento por me introduzirem nesse mundo da música.

Quero agradecer ainda ao Carlos Guedes como coordenador do curso, tal como ao Eugénio Amorim, sempre presentes durante os meus estudos na ESMAE.

Agradeço a António Sousa Dias, como arguente na defesa da Tese e pelas sugestões feitas.

Fora da escola, agradeço ao grupo de correspondentes electrónicos (lista de discussão) do sítio microsound.org, que me ajudou na procura dos textos relacionados com autómatos celulares e composição.

Dave Burraston, que escreveu uma Tese sobre música generativa e autómatos celulares, foi uma grande inspiração para mim, tal como Eduardo Reck Miranda, com a sua investigação sobre autómatos celulares e música.

Agradeço também às pessoas de quem recebi autorização para utilizar várias imagens para a minha Tese. Os seus nomes são mencionados abaixo.

Finalmente, quero agradecer às pessoas que me apoiaram durante os meus estudos. Em primeiro lugar, aos meus pais — obrigado pelo investimento que fizeram em mim! — à minha namorada e aos meus amigos. Agradecimentos ainda à direcção da ESMAE, por ter desenvolvido um departamento de composição de alto nível, e à comunidade portuguesa por me receber.

Todas as citações foram traduzidos pelo autor, encontrando-se em nota de rodapé as citações no idioma original.

- As figuras 5, 6, 8 e 9 são utilizadas com a autorização de *Wolfram Science* <http://wolframscience.com/downloads/>
- As figuras 10, 11 e 32 são feitas com um patch em MaxMsp de Robin Foster
- As figuras 12 e 26 são da Tese de doutoramento de Dave Burraston (2006)
- A figura 18 é copiada de Carretoro (2003) http://www-rohan.sdsu.edu/~rcarrete/teaching/M-596_patt/lectures/lectures.html
- A figura 24 é copiada de Scherer (2003) <http://karl.kiwi.gen.nz/CA-Wireworld.html>
- A figura 29 é copiada de Kirke e Miranda (2007)
- As figuras 32 e 33 são reproduções das figuras utilizadas nos textos de Makis Solomos
- A figura 34 é utilizada com autorização de edições Durand-Salabert-Eschig
- As figuras não referidas acima foram feitas por mim ou são imagens sob licença “creative commons”.

Lista de Figuras

Figura 1. Uma figura n' <i>O Jogo da Vida</i>	4
Figura 2: A regra sob forma gráfica. A linha superior mostra os estados da célula central e os 2 vizinhos, enquanto a linha inferior mostra-nos o estado da célula central na geração seguinte. Podemos ler esta linha inferior em números binários (da esquerda à direita) o que nos dá 01101001	8
Figura 3. Periodicidade	9
Figura 4. Reflexão	9
Figura 5. Valor fixo	9
Figura 6. Regra 30, primeiras 100 gerações	9
Figura 7. Regra 30 sob forma gráfica: a linha inferior pode ser lida (em retrógrado) em código binário, o que nos dá 01111000, que é 30 em números inteiros	10
Figura 8. Regra 90, também conhecida como o <i>triângulo de Sierpinski</i>	10
Figura 9. A regra sob forma gráfica: a linha inferior pode ser lida (em retrógrado) em código binário, o que nos dá 01011010, que é 90 em números inteiros	10
Figura 10. Regra 165, regra complementar da regra 90	11
Figura 11. Regra 110	11
Figura 12 . Regra 110: a linha inferior pode ser lida (em retrógrado) em código binário, o que nos dá 01110110, que é 110 em números inteiros	11
Figura 13. Exemplos das quatro classes (segundo Wolfram).	12
Figura 14. Regra 5 sob forma gráfica, onde se nota um comportamento periódico	14
Figura 15. Associação do parâmetro λ de Langton com as diferentes classes de Wolfram (adaptado de Burraston, 2006, p. 17). Note que um valor específico de λ pode ser associado a mais do que uma classe.	15
Figura 16. A vizinhança de Von Neumann	15
Figura 17. A vizinhança de Moore	16
Figura 18. <i>O Jogo da Vida</i> com um espaço contínuo sob forma dum toro	17
Figura 19. O <i>R-Pentomino</i>	18
Figura 20. O <i>blinker</i> , uma figura que consiste em 3 células, oscila entre duas formas; é um oscilador de período 2	19
Figura 21. O <i>glider</i> volta à forma inicial, depois de 4 passos, mas deslocado na diagonal à distância duma célula	19
Figura 22. Uma nave espacial	20
Figura 23. A configuração <i>Acorn</i> , descoberta por Charles Corderman	20
Figura 24. A configuração básica <i>Coelhos</i> de Trevorrow	21
Figura 25. <i>Lidka</i> , descoberta por Andrzej Okrasinski e David Bell	21
Figura 26. A configuração <i>Jardim de Éden</i> , de Roger Banks	21
Figura 27. A configuração descoberta por Achim Flammenkamp	22
Figura 28. Modelo dum circuito lógico feito em <i>Wireworld</i>	24
Figura 29. As células duma geração aplicadas em alturas: as células vivas (a preto) serão tocadas, de que resulta o acorde do – do# – re# – mi – sol	33
Figura 30. As células duma geração aplicadas aos ritmos	33
Figura 31. Uma imagem (fotografia instantânea) de CASS	34
Figura 32. Aplicação (x, y): as células (2, 4), (3, 3), (4, 3), (4, 4) e (4, 5) estão vivas	35
Figura 33. Uma imagem de <i>Cellular Beats</i>	36
Figura 34. As duas janelas principais de <i>Glitch Sequencer</i> : na primeira, está colocado o padrão inicial; na segunda, os triggers	37
Figura 35. A aplicação baseada em radiais (segundo Kirke e Miranda 2007)	38
Figura 36. Em cima, as duas primeiras gerações d' <i>O Jogo da Vida</i> ; em baixo, o resultado musical	39
Figura 37. O crivo que Xenakis utilizou: as duas numerações representam diferentes centros tonais	42
Figura 38. Reprodução do autômato utilizado nos cc. 10 e 14-15	44
Figura 39. <i>Horos</i> : fragmento da partitura (cc. 10-18)	47

Figura 40. As primeiras 5 gerações d'O <i>Jogo da Vida</i> , começando com o R-Pentomino. A evolução toda pode ser vista num patch em Max/MSP, incluído no disco.	51
Figura 41. A grande unidade (hiper-)métrica dividida em 7 partes menores.....	55
Figura 42. A figura à esquerda mostra os autômatos na forma original; a figura à direita mostra o segundo automato invertido, criando uma figura total que abre e se fecha	56
Figura 43. Regra 57, rodada 90 graus por motivos práticos	59
Figura 44. A inclinação do arpejo vai ficando menor ao longo da peça	60
Figura 45. As entradas são calculadas através da relação com o arpejo	61
Figura 46. C é nota comum: na primeira figura, esta nota não está ligada, de que resulta um buraco; na segunda, C fica sustentado no violino enquanto entra o trompete. Por conseguinte, há uma fase transitória, uma modulação tímbrica, que torna a música mais interessante.	61
Figura 47. A linha melódica do vibrafone ultrapassa a fronteira dos acordes	63
Figura 48. A linha melódica que parece uma onda; aqui também ultrapassa a fronteira dos acordes	64
Figura 49. Os quatro tipos de dinâmicas possíveis	65
Figura 50. Disposição da orquestra	67
Figura 51. A combinação da aplicação de notas e ritmos: cada nota surge sempre no mesmo tempo no compasso.....	69
Figura 52. Mudando o ponto de início, muda a posição da nota no compasso	69

Lista de Tabelas

Tabela 1. A regra sob forma duma tabela	7
---	---

Conteúdos

Resumo	ii
Abstract	ii
Currículo	iii
Certificado de Autoridade/Originalidade	iv
Agradecimentos	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Conteúdos	vii
Introdução	1
I PARTE	2
APRESENTAÇÃO DOS AUTÔMATOS CELULARES	2
Capítulo 1 Breve Resenha Histórica	2
Capítulo 2 Características Fundamentais	5
2.1 Características fundamentais	5
2.2 Funções de transição local	6
2.3 Condições dos extremos do autômato	8
2.4 Exemplos de autômatos elementares: as regras 30, 90 e 110	9

2.5 Classificações possíveis: o parâmetro λ de Langton	12
Capítulo 3 Autômatos Bi-Dimensionais	15
3.1 The Game of Life (“O Jogo da Vida”)	16
3.1.1 Formas da vida	18
3.1.2 Configurações de relevo: <i>Methuselah</i> — <i>O Jardim de Éden</i>	20
3.1.3 Variantes d’ <i>O Jogo da Vida</i>	22
3.2 Outros autômatos bi-dimensionais	23
Capítulo 4 Aplicações de Autômatos Celulares	24
4.1 Schelling Segregation Model	25
4.2 Urbanização	26
II PARTE	28
AUTÔMATOS CELULARES NA MÚSICA	28
Capítulo 5 Composição com Autômatos Celulares	28
Capítulo 6 Técnicas para Utilização dos Autômatos Celulares	32
6.1 Técnicas de aplicação em autômatos uni-dimensionais	33
6.1.1. Alturas	33
6.1.2 Ritmos	33
6.1.3 Combinações de parâmetros	33
6.2 Aplicar autômatos bi-dimensionais	34
6.2.1 Aplicação através de coordenadas (x, y).....	35
6.2.2 Aplicação baseada em coordenadas polares	38
6.3 Observações	39
Capítulo 7 Horos: Uma Obra Exemplar	40
7.1 O que levou Xenakis a utilizar autômatos celulares na sua música?	40
7.2 Como utiliza Xenakis os autômatos celulares em Horos?	42
7.3 Análise integral da peça	47
III PARTE	50
TRÊS ESTUDOS DE CASO	50
Capítulo 8 Orange Disco, para Dois Pianos	50
8.1 Conceito geral	50
8.2 Breve descrição da obra	51
8.3 Problemas encontrados e elementos a melhorar	52
8.4 Conclusão	54
Capítulo 9 Descaótico, para Dois Percussionistas	54
9.1 Conceito geral	54
9.2 Análise da obra	55
9.2.1 Plano geral.....	55
9.2.2 Análise da primeira parte	56
9.2.3 Análise da segunda parte	57
9.2.4 Tratamento das alturas	57
9.3 Conclusão	57
Capítulo 10 KRACHT, para Grande Orquestra	58
10.1 Fonte de inspiração	58
10.2 Análise da obra	58
10.2.1 Primeira camada: camada de fundo	59
10.2.2 Segunda camada: processos rítmicos	62
10.2.3 Terceira camada: dinâmicas	64
10.2.4 Quarta camada: orquestração	66
10.2.5 Quinta camada: elementos adicionais	67
10.3 Conclusão	68

Capítulo 11 Conclusão e Perspectivas Futuras	68
Referências	71

Introdução

Esta Tese constitui uma ferramenta teórica do meu projecto de investigação no curso de mestrado em composição e teoria musical. A escolha para investigar e escrever sobre composição com autómatos celulares encontra a sua fonte no interesse em composição com elementos extra-musicais. Para aprofundar a minha prática de escrita com autómatos celulares, surgiu a necessidade de investigar estes processos.

Tal investigação propõe algumas perguntas centrais:

1. O que são os autómatos celulares?

Para compor com autómatos celulares, temos de conhecer o fenómeno. Na I parte, é apresentado o universo dos autómatos celulares. Aí trato as características, exemplos de autómatos específicos e suas aplicações.

2. O que é a composição com autómatos celulares?

Para compor com autómatos celulares, temos que contextualizar esta prática. Na II parte, contextualizo a prática no espectro geral da música algorítmica.

3. Como podemos utilizar os autómatos celulares na música?

Os autómatos celulares possuem um potencial musical e é preciso encontrar maneiras para ligar o sistema dos autómatos celulares com o sistema musical. Na II parte da Tese, são introduzidas várias formas de utilização dos autómatos celulares. Finalizo com a análise duma obra exemplar.¹

4. Quais são os problemas que surgem no decorrer da composição com autómatos celulares?

Na III parte, apresento três estudos de caso. Trata-se duma análise pormenorizada de composições minhas, seguida duma discussão dos problemas que surgiam durante a composição da peça. Cada estudo de caso acaba com uma reflexão conclusiva.

5. Porquê utilizar autómatos celulares?

É esta a pergunta mais importante que me incentivou à realização deste trabalho. Durante toda a Tese, são apresentadas razões para a utilização dos autómatos celulares. Há citações de várias autoridades nas ciências e em música que justificam a sua utilização. Julgo que essas citações, juntamente com a própria investigação, são argumentos suficientes para mostrar que a utilização dos autómatos celulares na composição musical é uma abordagem interessante e justificada, tanto a nível técnico como estético.

¹ Esta tese está focalizada na música acústica. Por esta razão, uma obra de Xenakis é analisada pormenorizadamente. A razão desta escolha é simples: é o compositor mais conhecido a ter utilizado autómatos celulares. Por isso, não podia faltar nesta tese a apresentação duma obra sua.

I PARTE

APRESENTAÇÃO DOS AUTÓMATOS CELULARES

Capítulo 1 Breve Resenha Histórica

Os autómatos celulares têm a sua origem na pesquisa de John Von Neumann (1903-57). Este matemático americano tentou desenvolver uma máquina de reprodução automática. O seu artigo pioneiro “The general and logical theory of automata” apresenta uma nova visão da teoria de auto-reprodução, formulando a questão essencial: “Será que podemos construir um agregado a partir de tais elementos e de tal maneira que, se for colocado num reservatório em que flutuam todos estes elementos, cada um deles no fim revelar-se-á ser um outro autómato exactamente como o original?”² A ideia de Von Neumann era de construir então uma máquina que seria capaz de auto-reproduzir-se sem intervenção humana. Aí se dá uma resposta afirmativa a esta questão e, a partir dum novo modelo teórico, dela se faz prova. Novo impulso é, assim, dado à pesquisa científica nesta área. Seguindo Burks³, Von Neumann não estava interessado numa simulação ao nível genético e bio-químico, mas queria “*abstrair a forma lógica do problema de reprodução automática natural*”.

O pensamento de Von Neumann é um pensamento tipicamente lógico-matemático: se a auto-reprodução é feita através duma máquina bioquímica — muito complexa — o seu comportamento pode ser descrito como uma sequência lógica de passos, ou seja, como um algoritmo. Ora, se um algoritmo pode ser executado por qualquer máquina, então uma máquina de Turing⁴ (cuja

² John Von Neumann, “The general and logical theory of automata,” A. W. Taub, The Collected Works of John Von Neumann, ed. A. H. Taub, Vol. 5 (Oxford: Pergamon Press, 1961) 6 vols. 288-328. (p. 315) “Can one build an aggregate out of such elements in such a manner that if it is put in a reservoir, in which float all of these elements, each of which will at the end turn out to be another automaton exactly like the original one?”

³ Chris Langton, “Self-reproduction in cellular automata,” Physica D 10 (1984): 134-144.

⁴ Eric W Weisstein, Turing Machine, 2009 15 de Maio, 2009 15 de Maio <<http://mathworld.wolfram.com/TuringMachine.html>>. “Uma máquina de Turing é uma máquina de computação teórica inventada por Alan Turing (1937) para servir como um modelo idealizado para o cálculo matemático. Uma máquina de Turing consiste numa linha de células conhecidas como uma ‘fita’ que pode ser movida para trás e para a frente, um elemento activo conhecido como a ‘cabeça’ que possui uma propriedade conhecida como ‘Estado’ e que pode mudar a propriedade conhecida como ‘cor’ da célula

existência é meramente conceptual) poderá executar aquele mesmo algoritmo. Por essa razão, Von Neumann propôs-se mostrar a existência duma máquina Turing que podia efectuar a sua própria reprodução. Se tal máquina Turing existir, então é perfeitamente plausível que os processos de auto-reprodução de organismos vivos (e, por implicação, outros processos fundamentais para a vida) sejam susceptíveis de descrição algorítmica. Por conseguinte, a própria vida pode ser criada por máquinas.⁵

Em 1951, o matemático polaco Stanislaw Ulam (1909-84) sugeriu a Von Neumann construir o seu próprio autómato auto-reprodutor. A construção deste autómato *celular* — para usar a designação actual — foi esboçada logo no ano seguinte e completada em 1966, já depois da sua morte, pelo matemático americano Arthur Burks (1915-2008). O resultado final foi uma máquina universal Turing (inventada em 1936) embutida num autómato celular bidimensional, com 29 “estados” para cada “célula”, uma “vizinhança” de 5 células (conhecida como *Von Neumann neighbourhood*) e que precisava de 200.000 células aproximadamente.⁶ No entanto, nunca foi implementado. O sistema veio a ser simplificado por Codd,⁷ Langton⁸ e Reggia, Armentrout, Chou e Peng.⁹

A descoberta de Von Neumann abriu caminho a dois tipos diferentes de investigação: um, mais de carácter prático, que se propunha construir uma verdadeira máquina auto-reprodutora; o outro, mais de carácter matemático, propunha-se investigar as propriedades dos autómatos celulares. Esta proposta ficou confinada à década de 1960, tendo-se tornado algo esotérico, esmoreceu na década seguinte e foi retomada na década de 1980.

Ainda em 1960, investigou-se a utilização de autómatos no sentido de otimizar circuitos para operações aritméticas, entre outras. A partir da década de 1960, experimentou-se ligar

activa debaixo dela, e um conjunto de instruções como o chefe deve modificar a célula activa e mover a fita”. Em cada etapa, a máquina pode modificar a cor da célula activa, alterar o estado da cabeça, e depois mover a fita duma unidade para a esquerda ou para a direita”.

⁵ Chris Langton, “Self-reproduction in cellular automata,” *Physica D* 10 (1984): 134-144.

⁶ Todos estes termos serão explicados a seguir, no segundo capítulo.

⁷ Edgar F Codd, *Cellular Automata* (New York: Academic Press, 1968).

⁸ Chris Langton, “Self-reproduction in cellular automata,” *Physica D* 10 (1984): 134-144.

⁹ James A Reggia, et al., “Simple systems that exhibit self-directed replication,” *Science* 259.5099 (1993): 1282-1287.

“neurónios”¹⁰ numa matriz para simular redes neuronais, daí resultando um autómato celular bi-dimensional.

Em 1970, um autómato celular bi-dimensional designado *The Game of Life* chamou muito a atenção, não só do mundo científico mas também do mundo artístico, por causa da beleza das figuras que surgiam através de elementos e de regras tão simples, capazes de simular um sistema evolucionário (Fig. 1).

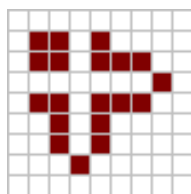


Figura 1. Uma figura n'O Jogo da Vida

Outros tipos específicos de autómatos celulares foram criados para utilização em situações (e com designações) muito diversas.

Só na década de 1980 houve um recrudescimento da investigação científica, principalmente graças ao físico e matemático inglês Stephen Wolfram (nascido em 1959). Começando em 1983 uma série de artigos em que redefiniu o domínio dos autómatos celulares, Wolfram expôs recentemente a sua visão abrangente num livro monumental, *A New Kind of Science* (2002), padrão de referência sobre o tópico.

¹⁰ Os neurónios são as células no cérebro responsáveis pelo processamento de informação no corpo. Podem ser ligados para transmitir sinais corporais.

Capítulo 2 Características Fundamentais

2.1 Características fundamentais

Os autómatos celulares têm quatro elementos fundamentais, que caracterizam a sua identidade específica:

- 1) a matriz global das células;
- 2) os estados possíveis de cada célula;
- 3) a sua vizinhança;
- 4) a regra de transição local.

A matriz pode ter um número qualquer de dimensões. Neste trabalho, consideraremos apenas autómatos uni-dimensionais e bi-dimensionais. Também há investigação feita sobre autómatos tri-dimensionais, embora seja menos extensa.

As células podem ter vários estados diferentes. Designa-se por k o número possível desses estados, sendo k um número inteiro igual a 2 ou maior. No caso em que $k = 2$, cada um dos estados pode ser descrito como “vivo” ou “morto”, a que correspondem respectivamente os símbolos 1 e 0 (em código binário) ou, graficamente, preto e branco. No primeiro autómato implementado por Von Neumann, cada célula tem 29 estados diferentes. No entanto, 2 é o número mais comum.

A vizinhança duma célula é definida pelo número de células ao lado (ou à volta) dessa célula central, estando esta também incluída. Tomemos o exemplo dum autómato uni-dimensional. Se uma célula central tem uma à esquerda e outra à direita, a vizinhança contém 3 células ao todo.

A regra de transição local (*local transition function*) é que define o estado das células (1 ou 0) em cada estágio do processo evolutivo; isto é, identifica-se com o modo como são geradas as células

do autómato. Esta regra depende da vizinhança. A sua aplicação efectua-se em momentos discretos, por passos no tempo ($t = 0, 1, 2, 3, \dots$), como se fossem ponteiros dum relógio. O tempo $t = 0$ é reservado para o estado inicial.

Em suma, todos estes quatro elementos em conjunto — a matriz celular, os estados possíveis duma célula, a sua vizinhança e a regra (ou funções) de transição local — constituem o autómato celular.

2.2 Funções de transição local

Uma condição determinante dum autómato celular é que a função de transição local, que rege os estados de cada célula num dado momento (*time step*) ou fase evolutiva, se baseia nos estados das células na sua vizinhança durante a(s) fase(s) anterior(es). As regras de transição têm, por isso, uma natureza estritamente local: cada célula tem influência no estado das células mais próximas e por elas é também influenciada. Assim, pode dizer-se que os padrões globais que emergem num autómato resultam da aplicação das regras de transição a nível local.

Há muitas funções de transição local diferentes, dependendo de vários factores — designadamente (1) a vizinhança de cada célula, (2) o seu número de estados e (3) a dimensão temporal. Nesta secção e nas próximas, consideraremos apenas autómatos uni-dimensionais; deixa-se para o capítulo 3 o exame dos autómatos bi-dimensionais.

Primeiro, a vizinhança é definida através do raio de alcance (*radius*), ou de integração unitária, duma célula. Por exemplo, $r = 1$ quer dizer que a célula central tem só uma outra de cada lado. Neste caso, a vizinhança (que inclui a célula central, naturalmente) é constituída por $2r + 1$ células. Consideremos, em segundo lugar, o número de estados possíveis (representado pelo símbolo k). Se $k = 2$, e mantendo $r = 1$ do exemplo anterior (isto é, uma vizinhança de $2r + 1$), teremos então 8 configurações diferentes, ou seja, 2^3 . Em geral, há k^{2r+1} estados em autómatos

uni-dimensionais. Finalmente, quanto à dimensão temporal, deve referir-se que os autómatos descritos acima são da “primeira ordem”; assim se designam quando o estado da célula actual só depende do seu estado (na geração ou fase evolutiva) anterior. Há investigação em autómatos de ordem superior realizada por Wolfram.¹¹

Com estes factores, vamos agora descrever autómatos celulares através de (1) fórmulas matemáticas, (2) tabelas e (3) de forma gráfica. Se definirmos $c_i(t)$ como o estado da célula i no momento t , esse estado no momento seguinte será $c_i(t+1)$. Matematicamente, então, podemos escrever a dependência do estado actual duma célula através dos estados das suas células vizinhas do lado esquerdo e do direito:

$$c_i(t+1) = \phi[c_{i-1}(t), c_i(t), c_{i+1}(t)]$$

Consideremos a seguinte função de transição local (representada pelo símbolo ϕ),

$$c_i(t+1) = (c_{i-1}(t) + c_i(t) + c_{i+1}(t)) \text{ mod } 2$$

onde mod 2 significa subtrair o resto após divisão daquela soma em 2, sendo o resultado sempre 0 ou 1. Podemos agora colocar esta regra sob a forma duma tabela, de acordo com Schiff.¹²

$C_{i-1}(t)$	$C_i(t)$	$C_{i+1}(t)$	$C_i(t+1)$
1	1	1	1
1	1	0	0
1	0	1	0
1	0	0	1
0	1	1	0
0	1	0	1
0	0	1	1
0	0	0	0

Tabela 1. A regra sob forma duma tabela

Uma maneira ainda mais cómoda para descrever (e, sobretudo, para compreender) uma função de transição local é fazer uma representação gráfica (Fig. 2). Na linha superior, colocamos a configuração actual; na linha inferior, colocamos o resultado que se obtém na geração seguinte.

¹¹ Stephen Wolfram, *A New Kind of Science* (Champaign: Wolfram Media, 2002).

¹² Joel L. Schiff, *Cellular Automata: A Discrete View of The World* (Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008). (p. 44)

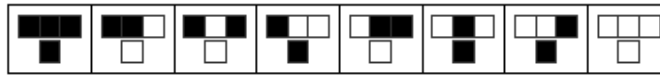


Figura 2: A regra sob forma gráfica. A linha superior mostra os estados da célula central e os 2 vizinhos, enquanto a linha inferior mostra-nos o estado da célula central na geração seguinte. Podemos ler esta linha inferior em números binários (da esquerda à direita) o que nos dá 01101001

Tendo em consideração as seguintes condições, $r = 2$, $k = 2$, com 8 padrões de vizinhança diferentes, haverá 2^8 (ou seja, 256) regras de transição possíveis. O cientista americano Weisstein¹³ classifica os autômatos celulares nestas condições como *elementares*. Utilizando a tabela acima, é possível descrever a regra em forma binária (10010110). Igualmente, podemos identificá-la na linha inferior da representação gráfica, em que um quadrado preto (célula viva) equivale a 1 e um quadrado branco (célula morta) equivale a 0. Aplicando isto à figura acima, teremos o número 10010110. Podemos traduzir (ou converter) este código binário em números inteiros, lendo da direita para a esquerda (01101001), o que nos dá 150. Daí, a regra ser conhecida como “regra 150”. Desta maneira, através de quantificação numérica, é possível designar todos os autômatos elementares.

2.3 Condições dos extremos do autômato

Um problema crucial que surge num autômato uni-dimensional tem a ver com as células que se situam nos extremos (esquerdo e direito) desse autômato. Como foi dito antes, o estado actual duma célula depende do estado anterior dessa célula e das células na sua vizinhança. Consideremos o caso $r = 1$, em que a célula central tem uma à sua esquerda e outra à direita. Surge então um problema nestes dois lados extremos, porque a cada uma destas células irá faltar uma — à esquerda e à direita, respectivamente — que lhe é complementar. Ora, é necessário uma vizinhança de ambos os lados para que uma célula possa evoluir. Para resolver isso, existem três soluções.¹⁴

1) Periodicidade: aqui as células extremas, do lado esquerdo e do direito, são consideradas vizinhas. Ligam-se, assim, os dois lados e um cilindro é criado.

¹³ Eric W Weisstein, “Elementary Cellular Automaton,” [Mathworld-A Wolfram Web Resource](http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html), 2009 15 de Maio <<http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>>.

¹⁴ Joel L Schiff, [Cellular Automata: A Discrete View of The World](#) (Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008). (pp. 47-49)

f	A	B	C	D	E	F	a
---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 3. Periodicidade

2) Reflexão: neste caso, duplicam-se as células dos lados extremos, cada uma tomando como vizinha uma cópia de si própria.

a	A	B	C	D	E	F	f
---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 4. Reflexão

3) Valor fixo: em alguns casos, os estados das células dos lados extremos mantêm-se inalterados. No exemplo que segue, em particular, as células dos extremos ficam vivas durante toda a evolução do autômato.

1	A	B	C	D	E	F	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 5. Valor fixo

2.4 Exemplos de autômatos elementares: as regras 30, 90 e 110

Regra 30

A representação gráfica desta regra é a seguinte,

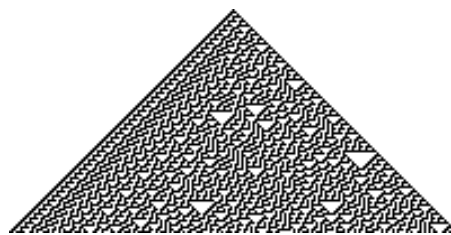


Figura 6. Regra 30, primeiras 100 gerações

que mostra um grau elevado de aleatoriedade. Ao investigar esta regra através de experiências estatísticas, Wolfram (1986) concluiu que a sequência dos estados 1 e 0 era totalmente aleatória. Começando com uma célula na primeira geração, o autômato cresce, mas não podemos descobrir

um padrão particular dentro esse triângulo. A conclusão de Wolfram foi testada recentemente em Gage, Laub e McGarry,¹⁵ que demonstram tal aleatoriedade.

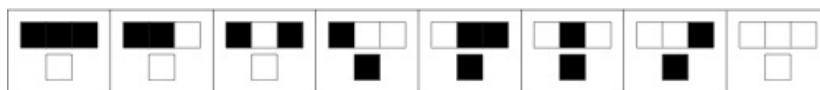


Figura 7. Regra 30 sob forma gráfica: a linha inferior pode ser lida (em retrógrado) em código binário, o que nos dá 01111000, que é 30 em números inteiros

Regra 90

A aplicação da regra 90 resulta (tal como as regras 18, 22, 26, 82, 146, 154, 210 e 218) numa forma triangular com dimensão fractal; isto é, no interior do triângulo maior, existem outros do mesmo tipo, mas de menor dimensão e em diferentes níveis hierárquicos. Esta figura foi descrita pelo matemático polaco Sierpinski em 1915 — daí ser conhecido como o “triângulo Sierpinski” — que todavia não a considerou como um autómato celular.¹⁶ Eis a sua representação gráfica:

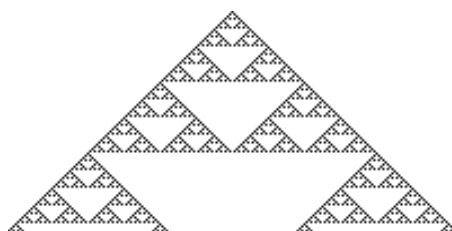


Figura 8. Regra 90, também conhecida como o triângulo de Sierpinski



Figura 9. A regra sob forma gráfica: a linha inferior pode ser lida (em retrógrado) em código binário, o que nos dá 01011010, que é 90 em números inteiros

Como objecto invertível (*ampichiral*),¹⁷ a regra 90 tem outra que lhe é complementar (a regra 165), e cuja representação gráfica é a sua imagem em espelho:

¹⁵ Dustin Gage, Elizabeth Laub e Briana McGarry, CELLULAR AUTOMATA: IS RULE 30 RANDOM? (Michigan: Central Michigan University, 2005).

¹⁶ Eric W Weisstein, “Rule 90,” 2009 15 de Maio, MathWorld--A Wolfram Web Resource, 2009 15 de Maio <<http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>>.

¹⁷ Designa-se por “ampichiral” um objecto que pode sobrepor-se à sua imagem invertida (em espelho plano). Eric W Weisstein, “Ampichiral,” MathWorld--A Wolfram Web Resource, 2009 15 de Maio <<http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>>.

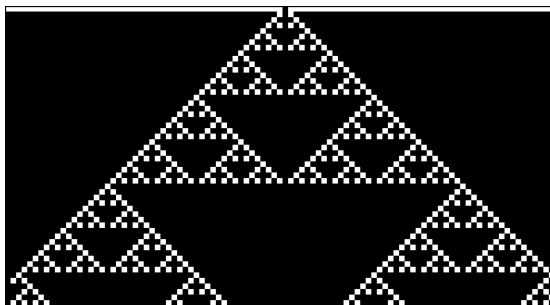


Figura 10. Regra 165, regra complementar da regra 90

A fórmula matemática da regra 90 é a seguinte

$$c_i(t+1) = (c_{i-1}(t) + c_{i+1}(t)) \bmod 2$$

Regra 110

O aspecto da regra 110, ao contrário da anterior, não parece muito interessante; falta-lhe uma estrutura saliente.

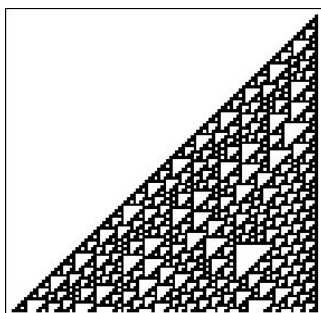


Figura 11. Regra 110



Figura 12 . Regra 110: a linha inferior pode ser lida (em retrógrado) em código binário, o que nos dá 01110110, que é 110 em números inteiros

De acordo com a informação de Schiff¹⁸, Wolfram achava que esta regra seria capaz de fazer computação universal. Isso mesmo veio a ser demonstrado na década de 1990 pelo seu assistente Matthew Cook.

¹⁸ Joel L Schiff, Cellular Automata: A Discrete View of The World (Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008). (p. 57).

2.5 Classificações possíveis: o parâmetro λ de Langton

Há várias maneiras de classificar os diferentes autômatos uni-dimensionais. Cedo foi feita uma tentativa — a mais conhecida — por Wolfram.¹⁹ Este matemático descreveu os autômatos celulares como “sistemas dinâmicos discretos, de construção simples, mas com um comportamento complexo que se auto-organiza”.²⁰ Investigou vários autômatos e propôs quatro classes, baseando-se nos resultados visuais das experiências empíricas:

Classe I — os padrões desaparecem com o tempo ou mantêm-se com valores fixos;

Classe II — os padrões evoluem até uma estrutura que se repete indefinidamente, ciclos periódicos com um número fixo dos estados;

Classe III — os padrões tornam-se caóticos e nunca se repetem, formando estados aperiódicos e aleatórios;

Classe IV — os padrões evoluem para formas complexas, apresentando estruturas localizadas que se movem espacial e temporalmente.

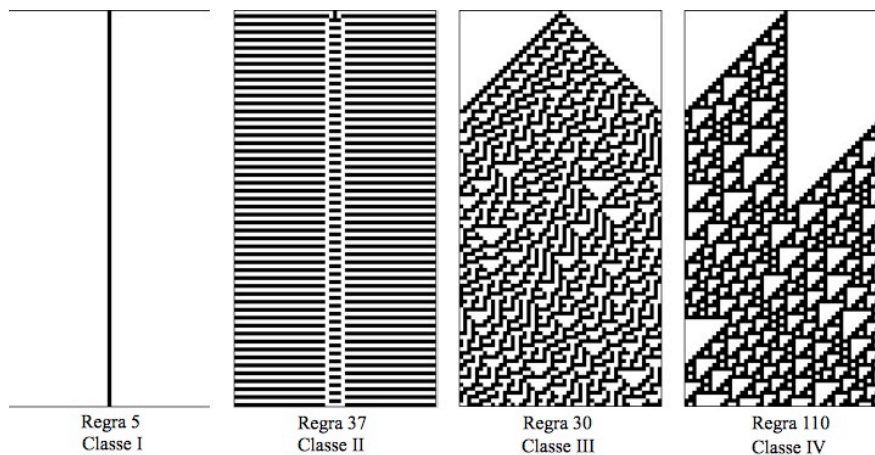


Figura 13. Exemplos das quatro classes (segundo Wolfram).

Outras classificações são possíveis, por exemplo, o sistema que distingue os autômatos em seis classes.²¹ A conclusão destes autores é que qualquer estratégia “depende dos interesses

¹⁹ Stephen Wolfram, “Universality and complexity in cellular automata,” *Physica D* 10.1 (1984): 1-35.

²⁰ Dave Burraston, *Generative Music and Cellular Automata*, Doctoral Dissertation (Sidney: University of Technology, 2006). (p. 15) “[CA are] discrete dynamical systems with simple construction but complex self-organising behaviour”.

²¹ Wentian Li e Norman Packard, “The Structure of the Elementary Cellular Automata Rule Space,” *Complex Systems* 4 (1990): 281-287.

particulares do investigador”, sendo todos eles “correctos”.²² Em geral, todavia, um sistema de classificação comporta normalmente três categorias de comportamento: ordenado, complexo ou caótico.

O parâmetro λ de Langton

O cientista americano Christopher Langton classificou os autómatos celulares segundo um parâmetro geral λ (“lambda” é uma letra do alfabeto grego) em 1986. O trabalho de Wolfram só considerava os 256 autómatos elementares. Ora, Langton estava interessado em utilizar autómatos mais complexos, com um número elevado de estados celulares e de vizinhança. Foi nesse sentido que propôs a utilização do parâmetro λ . De facto, para classificar estes autómatos de grande complexidade, a investigação empírica e visual de Wolfram seria extremamente difícil e pouco precisa. Langton trouxe simplicidade e rigor, através dum método quantitativo.

Em que consiste, afinal, este parâmetro? “O parâmetro λ ”, explica Rennard, “é, de facto, a probabilidade, entre todas as configurações de vizinhança possíveis, que uma dada configuração resulte numa célula ‘activa’, isto é: $1 -$ (o número de transições [com células] imóveis dividido pelo número total de transições)”.²³ Consiste num número entre 0 e 1, tendo estes significados opostos; 0 mostra um comportamento fixo e 1 mostra comportamento caótico. É calculado através da fórmula seguinte:

$$\lambda = \frac{k^{\rho} - n_q}{k^{\rho}}$$

K é o número dos estados possíveis; ρ , o das células vizinhas; n_q o dos estados imóveis da célula central (na fase seguinte), que resulta destes estados de vizinhança. Se $n_q = k^{\rho}$, todos os estados são imóveis e $\lambda = 0$. Se $n_q = 0$, não há estados imóveis e $\lambda = 1$. Se todos os estados estão

²² Dave Burraston, *Generative Music and Cellular Automata*, Doctoral Dissertation (Sidney: University of Technology, 2006). (p. 16) “[Any scheme] depends on the particular interests of the researcher, all of which are ‘correct’”.

²³ Jean-Philippe Rennard, “Introduction to Cellular Automata,” 2006 Maio, [Rennard.org](http://www.rennard.org), 2009 15 de Maio <<http://www.rennard.org/alife/english/acintrogb01.html>>. “The λ parameter is, in fact, the probability, within all possible neighbourhood configurations, that one given configuration should lead to an “active” cell, i.e.: $1 -$ (number of quiescent transitions/ total number of transitions)”.

representados igualmente, $\lambda = 1 - 1/k$. Expliquemos com um exemplo: se $k = 3$ e $r = 1$, há $3^3 = 27$ estados de vizinhança. Se representarmos esses três estados com 1, 2 e 0, e cada um aparecer com frequência igual — isto é, nove vezes cada um — $2/3$ do total (18 de 27) vão ser diferentes de zero (não imóveis), o que corresponde a $\lambda = 1 - 1/3$. Estatisticamente, esta equação dá-nos o resultado (*output*) mais heterogêneo. Por isso, o âmbito que nos interessa é $0 \leq \lambda \leq 1 - 1/k$, ou seja, nem o comportamento fixo nem o caótico.

Calcula-se agora, a título de exemplo, a Regra 5:

$$\lambda = \frac{8-6}{8} = 0.25$$

Como vimos, o resultado 0,25 corresponde à classe II, isto é, em que a regra mostra um comportamento periódico. Tal como o cálculo anterior, os dois exemplos que a seguir se reproduz (Figs. 14 e 15) são de Schiff.²⁴

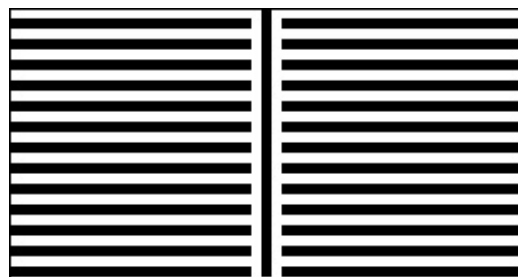


Figura 14. Regra 5 sob forma gráfica, onde se nota um comportamento periódico

O parâmetro λ pode ser aplicado nos 256 autômatos elementares. Assim, podemos comparar o grau de caos com as classes de Wolfram. Na figura seguinte, veremos que a classe IV está associada à classe II e vem antes da classe III. Na classe IV, há estruturas periódicas que *interagem*, o que não acontece com as estruturas periódicas da classe II. Por causa desta interação complexa, o comportamento da classe IV está ligado ao comportamento aleatório da classe III. Em suma, podemos colocar os comportamentos na seguinte ordem, com o valor 0 do lado esquerdo e $1 - 1/k$ do lado direito.

²⁴ Joel L Schiff, Cellular Automata: A Discrete View of The World (Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008). (pp. 78-79)

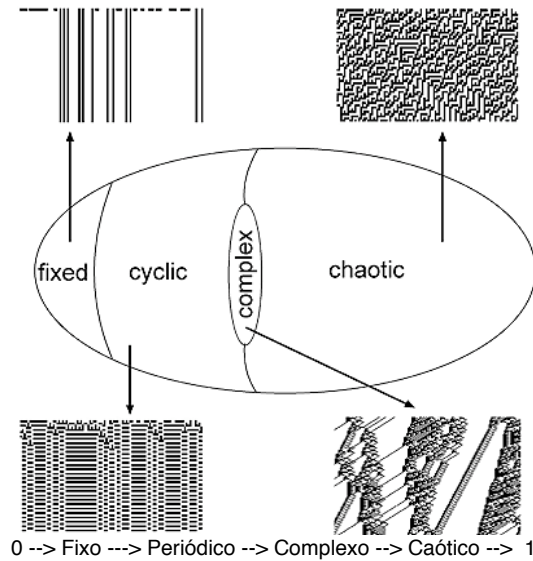


Figura 15. Associação do parâmetro λ de Langton com as diferentes classes de Wolfram (adaptado de Burraston, 2006, p. 17). Note que um valor específico de λ pode ser associado a mais do que uma classe.

Capítulo 3 Autômatos Bi-Dimensionais

Os autômatos bi-dimensionais partilham várias características com os autômatos uni-dimensionais. Há dois tipos diferentes de vizinhança que a maioria dos autômatos bi-dimensionais utiliza. O primeiro é conhecido como a “vizinhança de Von Neumann”, que consiste num grupo de 4 células (tendo em conta também os seus estados) à volta da célula central; ou num grupo de 5, se contabilizarmos a célula central. Foi este que Von Neumann utilizou na sua investigação para construir uma máquina auto-reprodutora.

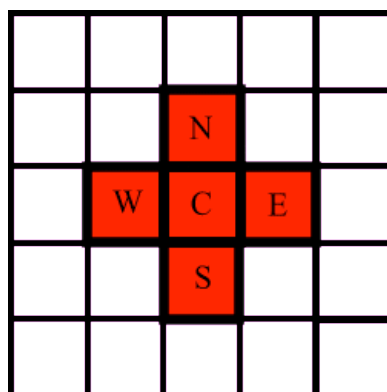


Figura 16. A vizinhança de Von Neumann

O segundo tipo é a “vizinhança de Moore”, que tem uma forma quadrada, ao contrário da de Von Neumann, em forma de diamante. Se $r = 1$, a vizinhança consiste em 8 células; ou 9, se contabilizarmos a célula central.

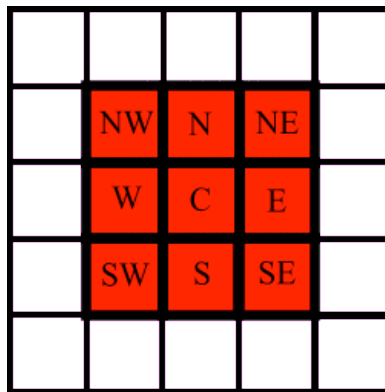


Figura 17. A vizinhança de Moore

No caso dos autômatos uni-dimensionais, com $k = 2$ e $r = 1$, havia $2^3 = 8$ estados de vizinhança possíveis (cf. *supra* 2.2 “Funções de transição local”). No caso dos autômatos bi-dimensionais, e pressupondo as mesmas condições, há $2^9 = 512$ estados de vizinhança possíveis. Este último número implica que há $2^{512} \approx 10^{154}$ funções de transição local. Com a vizinhança de Von Neumann, há $2^{32} \approx 10.000.000.000$ (dez mil milhões) de funções de transição. Outros tipos de vizinhança existem ainda, para além dos de Von Neumann e de Moore.²⁵

3.1 The Game of Life (“O Jogo da Vida”)

Este jogo, concebido por John Conway, foi apresentado ao mundo em 1970, num artigo da revista *Scientific American*. Logo captou muita atenção. O objectivo de Conway era fazer uma simulação da vida, com três regras muito simples:

- 1) Sobrevivência — uma célula com 2 ou 3 células vizinhas vivas sobrevive (isto é, fica no estado = 1) na próxima geração;
- 2) Morte — uma célula com 4 ou mais células vizinhas vivas *morre* (vai para estado 0) devido a excesso de população; *morre* também por isolamento, se tiver só uma célula vizinha viva.

²⁵ Um catálogo vasto pode ser consultado em <http://cell-auto.com/neighbourhood>.

3) Nascimento — uma célula vazia (ou morta), que tenha 3 células vizinhas vivas (tem que ser exactamente este número), *nasce* como célula viva na próxima geração.

O Jogo da Vida utiliza a vizinhança de Moore, quer dizer, 8 células vizinhas possíveis para uma célula central. Tal como vimos nos autômatos uni-dimensionais, existe aqui também o problema dos extremos. A solução mais comum é juntar os lados para criar um espaço contínuo, daí resultando a forma dum toro (Fig. 18), que corresponde ao tipo de *periodicidade* (cf. 2.3 “Condições dos extremos do autômato”).

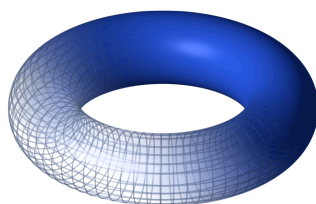


Figura 18. O Jogo da Vida com um espaço contínuo sob forma dum toro

Packard e Wolfram²⁶ classificam *O Jogo da Vida* como um autômato da classe IV, muito menos comum na versão bi-dimensional, o que significa que surgem estruturas definidas e persistentes. Por outro lado, Conway defendia que era impossível um padrão crescer infinitamente, como refere Gardner,²⁷ prometendo até um prémio simbólico de \$50 para quem conseguisse encontrar um padrão de crescimento ilimitado. O prémio foi reclamado no mês de Novembro desse mesmo ano por uma equipa do Massachusetts Institute of Technology (MIT), que demonstrou ser errado tal pressuposto de Conway.

É fascinante o resultado estético deste jogo, em que surgem padrões bonitos, variados e inesperados; mais admirável ainda conceptualmente, talvez, quando se sabe que tudo isso decorre apenas da aplicação de três regras muito simples.

²⁶ Norman H Packard e Stephen Wolfram, “Two-Dimensional Cellular Automata,” *Journal of Statistical Physics* 38.5/6 (1985).

²⁷ Martin Gardner, “MATHEMATICAL GAMES The fantastic combinations of John Conway’s new solitaire game “life,”” *Scientific American* 223 (1970): 120-123.

3.1.1 Formas da vida

Formas simples

N’O *Jogo da Vida* existem formas, também conhecidas como configurações ou padrões, bastante interessantes²⁸. As formas mais simples são grupos de 3 células. Essas formas morrem ou estabilizam muito rapidamente (no máximo, em duas gerações). Grupos de 4 células podem sobreviver mais tempo, acabando como formas estáveis ou oscilantes. Uma forma de 5 células muito interessante é o *R-Pentomino* (Fig. 19), que só estabiliza depois 1.103 gerações.^{29 30} “Este é, de longe, o *polyomino*³¹ mais activo com menos de 6 células”, explica Weisstein; “todas as outras formas estabilizam, no máximo, em 10 gerações”.³²

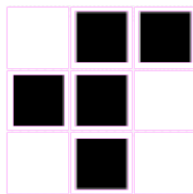


Figura 19. O R-Pentomino

Formas fixas

Formas fixas são formas que não mudam. O bloco de 4 células é a forma mais simples e a mais comum no Jogo da Vida. Todas as células ficam vivas porque há sempre 3 células vivas na vizinhança, mas as células mortas ao lado do bloco só têm 2 células vivas na sua vizinhança, o que é insuficiente para mudar de estado.

Oscilantes

Oscilantes são configurações que apresentam um comportamento periódico, oscilando infinitamente entre um número fixo de formas. O número depois do nome corresponde ao número

²⁸ Pode encontrar-se uma grande colecção no sítio <http://www.ericweisstein.com/encyclopedias/life>.

²⁹ Martin Gardner, “MATHEMATICAL GAMES The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life",” *Scientific American* 223 (1970): 120-123.

³⁰ Jean-Philippe Rennard, “Introduction to Cellular Automata,” 2006, [Rennard.org](http://www.rennard.org), 2009 15 de Maio <<http://www.rennard.org/alife/english/acintrogb01.html>>.

³¹ Um *polyomino* é uma figura que consiste em n quadrados de tamanho igual com os lados coincidentes.

³² Eric W Weisstein, “R-Pentomino,” [ERIC WEISSTEIN'S TREASURE TROVE OF THE LIFE CELLULAR AUTOMATON](http://www.ericweisstein.com/encyclopedias/life/R-Pentomino.html), 2009 15 de Maio <<http://www.ericweisstein.com/encyclopedias/life/R-Pentomino.html>>. “This is by far the most active polyomino with less than six cells; all the others stabilize in at most 10 generations”.

das formas que o período contém. Por exemplo, um oscilador de período 2 oscila entre duas formas diferentes; um oscilador de período 3, entre três formas diferentes.



Figura 20. O blinker, uma figura que consiste em 3 células, oscila entre duas formas; é um oscilador de período 2

Gliders

Gliders são configurações de 5 células que se movem na matriz em sentido diagonal. O nome “glider” é dado porque, no tempo $t + 2$, surge uma reflexão da figura original em sentido diagonal. A forma original volta no tempo $t + 4$, mas deslocado na diagonal à distância duma célula. Este ciclo de quatro passos é repetido eternamente (Fig. 21).

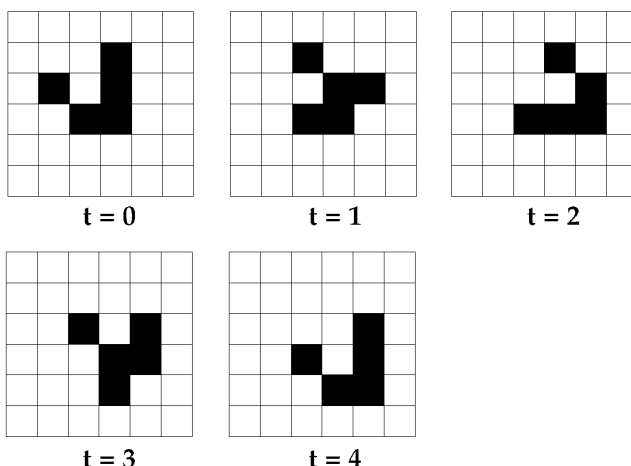


Figura 21. O glider volta à forma inicial, depois de 4 passos, mas deslocado na diagonal à distância duma célula

N’O *Jogo da Vida*, a velocidade máxima a que a informação duma célula se desloca para outra (no sentido horizontal, vertical ou diagonal) é conceptualizada como a velocidade da luz, c . Um *glider* desloca-se na diagonal à distância duma célula, 4 gerações volvidas; por conseguinte, move-se a $1/4$ da velocidade da luz. Conway demonstrou que a velocidade máxima possível n’O *Jogo da Vida* é $c/2$. Esta velocidade apenas é alcançada por naves espaciais (*spaceships*) (Fig. 22).

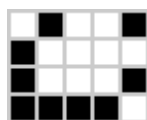


Figura 22. Uma nave espacial

Glider guns são configurações que produzem *gliders* em ciclos de 30 gerações, tornando possível a continuação até ao infinito d’*O Jogo da Vida*. O *glider gun* foi desenvolvido por uma equipa do MIT: Robert April, Michael Beller, William Gosper, Richard Howell, Richard Schroepper e Michael Speciner. Foi precisamente com esta pesquisa que eles ganharam o prémio prometido por Conway na revista *Scientific American*.³³

3.1.2 Configurações de relevo: *Methuselah* — *O Jardim de Éden*

Um desafio n’*O Jogo da Vida* é encontrar configurações básicas que possam evoluir o máximo de tempo possível. Martin Gardner³⁴ designa-as pelo nome de *Methuselah* (Matusalém é a personificação da longevidade que, segundo o *Génese* 5: 21-27, viveu 969 anos). Várias configurações existem; *R-Pentomino* acima descrito é uma delas. *Acorn* (Fig. 23) é outra, descoberta por Charles Corderman, que fica activa durante 5.206 gerações. A configuração *Rabbits* (“Coelhos”) (Fig. 24) de Trevorrow fica activa durante 17.331 gerações, depois atinge um ciclo de período 2. *Lidka* (Fig. 25), descoberta por Andrzej Okrasinski e David Bell, começa com 13 células e acaba com 1.623 células, depois estabiliza em 29.055 gerações.³⁵

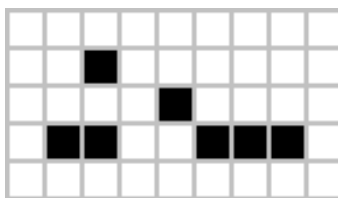


Figura 23. A configuração Acorn, descoberta por Charles Corderman

³³ Joel L Schiff, *Cellular Automata: A Discrete View of The World* (Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008). (p. 99).

³⁴ Martin Gardner, “MATHEMATICAL GAMES The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life",” *Scientific American* 223 (1970): 120-123.

³⁵ Stephen Silver, *Stephen Silver's Life Page*, 6 de Maio de 2005, 15 de Maio de 2009 <<http://www.argentum.freemove.co.uk/life.htm>>.

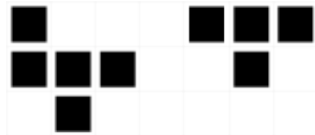


Figura 24. A configuração básica Coelhos de Trevorrow

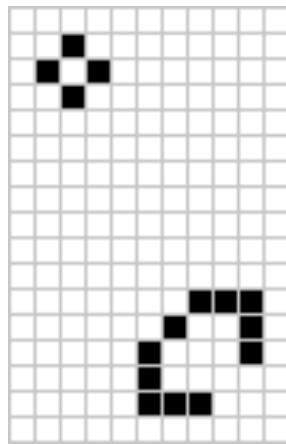


Figura 25. Lidka, descoberta por Andrzej Okrasinski e David Bell

Durante o jogo surgem padrões diferentes. Poderá haver configurações que não surjam durante a evolução, sendo só configurações básicas? A uma configuração deste tipo, sem precedente, chama-se um padrão do *Jardim de Éden*, segundo a designação de John W. Tukey. Em 1962, Moore sugeriu que, se há um padrão com mais que um antepassado, teria de haver um padrão sem antepassado — o *Jardim do Éden*.³⁶ Em 1971, Roger Banks descobriu o primeiro padrão com 226 células vivas (Fig. 26).

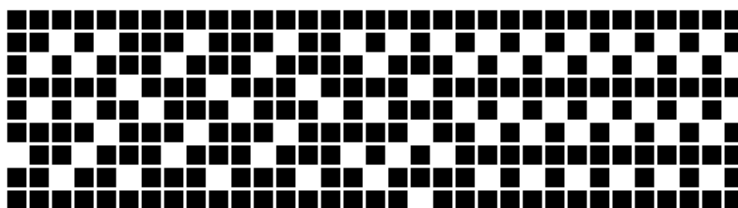


Figura 26. A configuração Jardim de Éden, de Roger Banks

O padrão com menos células é descoberto por Achim Flammenkamp,³⁷ com 72 células vivas numa matriz de 12X11 células (Fig. 27).

³⁶ Eric W Weisstein, “Garden of Eden,” [ERIC WEISSTEIN'S TREASURE TROVE THE LIFE CELLULAR AUTOMATON](http://ericweisstein.com/encyclopedias/life/gardenofeden.html), 2009 15 de Maio <[HTTP://ERICWEISTEIN.COM/ENCYCLOPEDIAS/LIFE/GARDENOFEDEN.HTML](http://ericweisstein.com/encyclopedias/life/gardenofeden.html)>.

³⁷ Achim Flammenkamp, “Garden of Eden/ Orphan,” 2008 7 de Novembro, [Achim](http://www.whomes.uni-bielefeld.de/achim/orphan_2nd.html), 2009 15 de Maio <http://www.whomes.uni-bielefeld.de/achim/orphan_2nd.html>.



Figura 27. A configuração descoberta por Achim Flammenkamp

3.1.3 Variantes d'O Jogo da Vida

O Jogo da Vida é o autômato bi-dimensional mais conhecido, do qual existem muitas variantes — com regras, vizinhanças e/ou outros elementos alterados. Uma variante é *Immigration*, de Don Woods, criado em 1971. Este autômato é mesmo concebido como se fosse um jogo: os jogadores podem influenciar o jogo e, por consequência, a evolução do autômato. A possibilidade de interferir no jogo era alheio ao determinismo original d'*O Jogo da Vida*; a sua inclusão em *Immigration* veio adicionar um elemento competitivo. Três estados (dois ON, um OFF) são utilizados nesta variante. A regra do jogo estipula que uma nova célula será conforme ao estado da maioria das três células-mãe; por outro lado, uma célula sobrevivente manterá o estado que tinha na geração anterior. Esta regra, conhecida como “vida dos três estados” (dois ON e um OFF), funciona bem e resulta em fenómenos novos e interessantes. Pode ser utilizada, por exemplo, para localizar os resultados das interações entre dois objectos, para mostrar qual o objecto responsável por uma parte do padrão resultante. Em muitos casos, o padrão final contém células com os dois estados ON, ou mesmo objectos híbridos com os dois estados, ON e OFF.³⁸

Outra variante é *Highlife*, criado em 1994 por David I. Bell.³⁹ Basicamente, as regras do nascimento das células são aqui alteradas. Para nascer, uma célula precisa de três ou de seis vizinhas vivas, em vez de duas células apenas. Para sobreviver, basta duas células vizinhas vivas. *Highlife* tem semelhanças com *O Jogo da Vida*, mas cria alguns resultados novos e fascinantes. Um padrão específico de *Highlife* é o “replicador”, que consiste em seis células. Doze

³⁸ H. Koenig, “Colored Life,” 2006 Março, [Game of Life News](http://pentadecathlon.com/lifenews/life_variants), 2009 15 de Maio <http://pentadecathlon.com/lifenews/life_variants>.

³⁹ David Ingalls Bell, “HighLife — An Interesting Variant of Life (Part 1/3),” 2009 15 de Março, [The home page of David Ingalls Bell](http://members.tip.net.au/~dbell/articles/), 2009 15 de Maio <<http://members.tip.net.au/~dbell/articles/>>.

gerações volvidas, faz cópias de si mesmo em linha diagonal. Também há replicadores n’*O Jogo da Vida*, mas ainda não se encontraram padrões deste tipo capazes de fazer cópias de si mesmo.

3.2 Outros autómatos bi-dimensionais

Existem muitos outros autómatos bi-dimensionais, além d’*O Jogo da Vida*. Um modelo clássico é *Brian's Brain*, de Brian Silverman. A maioria dos autómatos celulares funcionam com dois estados possíveis; o *Brian's Brain* utiliza três — “pronto” (*ready*, em inglês, é o estado 0 e de cor preta), “a disparar” (*firing*, estado 1 e cor branca) e “refractário” (*refractory*, estado 2 e cor vermelha). As regras essenciais deste autómato têm alguma semelhança com o modo de comportamento dos neurónios no nosso cérebro:

- Uma célula só *dispara* se estiver no estado “pronto” (ou 0) e dois vizinhos (de entre os oito possíveis) estiverem a *disparar*.
- Depois de *disparar*, uma célula muda para o estado “refractário” (ou 2) durante uma geração; na geração seguinte, volta ao estado “pronto” (ou 0).

Tal como n’*O Jogo da Vida*, todavia, *Brian's Brain* tem formas complexas chamadas *haulers*, *butterflies* e *twizzlers*. *Butterflies* são o equivalente dos *gliders* n’*O Jogo da Vida* e movem-se diagonalmente na matriz, à velocidade duma célula de quatro em quatro gerações, ou seja, $c/4$.⁴⁰ O aspecto que é “especialmente interessante observar” neste autómato, de acordo com Wilensky, resulta do facto de haver “muitas configurações que atravessam constantemente a matriz (ao contrário [d’*O Jogo da Vida*], que tem relativamente poucas configurações deste tipo)”.⁴¹

Wireworld é outro autómato concebido por Brian Silverman, em 1984. Como explica Pegg, “a regra do autómato utiliza o valor antigo_{*a*} da célula, a que se acrescenta o número_{*u*} dos seus oitos

⁴⁰ Joel L Schiff, *Cellular Automata: A Discrete View of The World* (Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008). (pp. 110-111).

⁴¹ Uri Wilensky, “NetLogo Brians Brain Model,” 2002, *Netlogo*, 2009 15 de Maio <<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/BriansBrain>>. “This CA is especially interesting to watch because it has many configurations that move steadily across the grid (as opposed to Life, which has only relatively few such configurations)”.

vizinhos que estão configurados para [o estado] 1, de acordo com um sistema que *grosso modo* modela o fluxo de correntes em fios, de acordo com as seguintes regras.

0. A cor [ou estado] 0 é tida como fundo e mantém-se sempre como tal.
1. A cor 1 é tida como cabeça de electrão e transforma-se sempre em cauda de electrão.
2. A cor 2 é uma cauda de electrão e transforma-se em fio.
3. A cor 3 é fio, que se mantém como fio a não ser que seja 1 ou 2, transformando-se neste caso em cabeça de electrão”.⁴²

Seguindo estas regras, podem construir-se vários circuitos lógicos. Eis um modelo feito em *Wireworld* (Fig. 28).

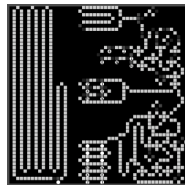


Figura 28. Modelo dum circuito lógico feito em Wireworld

Uma aplicação deste autómato é um computador (ou programa) capaz de testar se se trata, ou não, de números primos. O matemático inglês Mark Owen⁴³ concebeu a sua utilização para modelar circuitos electrónicos.

Capítulo 4 Aplicações de Autómatos Celulares

Os autómatos celulares têm várias aplicações em diferentes domínios da ciência, por exemplo, em biologia, em química, em sociologia ou em urbanística. A razão é clara: com meios simples,

⁴² Ed Jr. Pegg, “WireWorld,” [MathWorld--A Wolfram Web Resource](http://mathworld.wolfram.com/WireWorld.html), 2009 15 de Maio <<http://mathworld.wolfram.com/WireWorld.html>>. “The rule for the automaton uses the cell's old value together with the number of its eight neighbors that are set to 1 according to a system that roughly models the flow of currents in wires according to the following rules”.

0. The color 0 is considered background, and always stays as background.
1. The color 1 is considered an electron head, and always turns into an electron tail.
2. The color 2 is an electron tail, and always turns into wire.
3. The color 3 is wire, which remains wire unless is 1 or 2, in which case it becomes an electron head”.

⁴³ Mark St John Owen, “The Wireworld Computer.,” 2009 22 de Março, [quinapalus.com](http://www.quinapalus.com), 2009 15 de Maio <<http://www.quinapalus.com/wires0.html>>.

mostram um fenómeno complexo. O potencial dos autómatos celulares para aplicação nas ciências será agora apresentado através de dois exemplos.

4.1 Schelling Segregation Model

Os autómatos celulares interagem a nível local, isto é, têm uma interacção intercelular. Veja-se, por exemplo, a sua aplicação no domínio da sociologia, onde a interacção entre humanos é um elemento fundamental na pesquisa. O economista americano Thomas Schelling⁴⁴ apresentou, em 1971, um modelo para investigar o fenómeno da segregação racial — aplicável, naturalmente, a outros parâmetros sociais, tal como sexo, idade, rendimento, língua ou religião. Acreditava que a segregação não resulta dum processo global, mas que eram várias interacções pequenas, mais ou menos independentes, que definem um resultado colectivo. Num bairro habitado por pessoas brancas e negras, ao cabo de algum tempo, os grupos raciais não mantêm o mesmo número. A razão disto é que há um limite de tolerância proporcional para aceitar conviver com o outro grupo étnico, a partir do qual os indivíduos se deslocam. Se é possível definir um grupo maioritário a nível global, isso tornar-se-á impossível a nível local: a prazo, resulta num fenómeno de segregação. Para implementar um modelo num autómato celular, Schelling utilizou, primeiro, um modelo uni-dimensional, depois, uma matriz bi-dimensional, onde colocou uma população inicial. Cinco elementos são determinantes neste modelo:

- o tamanho da vizinhança celular (utiliza-se a vizinhança de Moore);
- a percentagem da cor para a célula ficar “satisfeita”, sem precisar de se deslocar;
- o rácio entre preto e branco, a nível global;
- as regras de deslocação (para onde vai uma célula quando muda?);
- a população inicial.

Schelling criou o seguinte critério: “Se a proporção dos vizinhos numa vizinhança de Moore com oito células, que são do mesmo tipo (estado) que a célula central, fica menor que um limiar x ,

⁴⁴ Thomas C Schelling, “Dynamic models of segregation,” Journal of Mathematical Society 1.2 (1971): 143- 186.

então a célula central desloca-se para um sítio “perto” onde a proporção de células vizinhas do mesmo tipo é igual ou maior do que x .⁴⁵ As experiências feitas com este modelo deram resultados notáveis: mesmo com um valor x muito baixo, as vizinhanças que eram inicialmente integradas acabavam por ficar muito segregadas.

A diferença em relação a um autômato celular tradicional é que não há mortes nem nascimentos de células; o seu número é constante. Por consequência, uma célula desloca-se para outro sítio na matriz — aquele que fica mais perto, dentro do seu estado de satisfação (ou grau de tolerância), que não é necessariamente uma célula vizinha.

4.2 Urbanização

Um sistema urbano pode ser considerado como um sistema auto-organizado, em que limitações naturais (de carácter geográfico) e humanas (de carácter legal) influenciam o modo como essa área evolui. Portanto, um autômato celular (que é também um sistema auto-organizado) é um modelo muito bom para investigar o fenómeno da urbanização. Há vários modelos urbanos que utilizam autômatos celulares. É possível utilizá-los para gerar resultados susceptíveis de explicação teórica urbanística, para simular cidades reais ou para desenvolver novos modelos de planeamento.⁴⁶ Em relação aos autômatos celulares tradicionais, estas regras de evolução (ou funções de transição local) são mais complicadas. Primeiro, outros tipos de vizinhança, para além das de Moore e de Von Neumann, foram desenvolvidos para se aplicar à modelação urbana. Depois, as funções de transição local podem mudar ao longo da evolução urbanística. Finalmente, os estados das células podem representar tipos de ocupação da zona urbana (indústria, residência, agricultura, etc). A descrição mais abrangente, mas não completa, das aplicações

⁴⁵ Joel L Schiff, [Cellular Automata: A Discrete View of The World](#) (Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008). (p. 133) “If the proportion of neighbors in an eight-cell Moore Neighborhood that are of the same kind (state) as the central cell becomes lower than some threshold x , then the central cell moves to a “nearby” site in which the neighborhood has a proportion of neighbors of the same kind is at least x ”.

⁴⁶ Antonia Mavroudi, [Simulating City Growth by using the Cellular Automata Algorithm](#), Master Dissertation (London: University of London, 2007).

diferentes dos autómatos celulares para fins urbanísticos encontra-se em Ward, Murray e Phinn.⁴⁷

É interessante referir que os autómatos celulares foram utilizados no jogo *Sim[ulation] City*, precisamente onde uma cidade é gerida pelo jogador.

Mavroudi⁴⁸ implementou um autómato celular para investigar a evolução da cidade de Salónica, na Grécia. A pesquisa começa a partir duma situação real — a cidade de Salónica em 1991. Foi criado um autómato celular bi-dimensional com regras próprias, e a evolução da cidade foi simulada. Depois, os resultados da experiência foram comparados com a situação real.

O que é importante nesta implementação é que um fenómeno tão complexo como o processo evolutivo duma cidade, particularmente as pequenas interacções, é descrito e explicado de maneira simples. Assim pode compreender-se melhor a razão que tinha Von Neumann em desenvolver autómatos celulares na década de 1950 — o seu objectivo era *simplificar um problema complexo, para melhor compreendê-lo*.

⁴⁷ Douglas P Ward, Alan T Murray e Stuart R Phinn, “Integrating spatial optimization and cellular automata for evaluating urban change.,” *Annals of Regional Science* 37.1 (2003): 131-148.

⁴⁸ Antonia Mavroudi, *Simulating City Growth by using the Cellular Automata Algorithm*, Master Dissertation (London: University of London, 2007).

II PARTE

AUTÓMATOS CELULARES NA MÚSICA

Neste capítulo pretende-se mostrar diversas técnicas de utilização de autómatos celulares em música, bem como analisar uma obra exemplar que utiliza autómatos celulares na sua construção. Portanto, começo por contextualizar a prática de composição com autómatos celulares.

Capítulo 5 Composição com Autómatos Celulares

Construir uma composição utilizando elementos extra-musicais é uma prática antiga. Tal prática é denominada “música algorítmica”, pois depende dum algoritmo. Por exemplo, Guillaume Dufay baseou os tempos do seu moteto *Nuper Rosarum Flores* nas proporções da catedral de *Santa Maria del Fiore* em Florença⁴⁹ e, noutras obras, utilizou ainda a regra de ouro. Também utilizou processos sistematizados, como inversão e retrógrado.⁵⁰ Outro exemplo é o de Guillaume de Machaut, que utilizou sequências rítmicas como técnica formal nos seus motetos isorrítmicos.⁵¹ Posteriormente, na época clássica, Mozart utilizou um processo algorítmico na sua obra *Musikalisches Würfelspiel*. Esta “peça” é composta por duas matrizes de 11 x 8 e uma partitura composta por 196 fragmentos musicais numerados. Uma sequência numérica é criada aleatoriamente quando se lançam os dados, sequência essa que corresponde aos fragmentos previamente numerados. Da ordenação destes fragmentos resulta, assim, a peça na sua totalidade. Mozart escreveu os fragmentos de forma a criar uma peça tonal, de acordo com o estilo da época. Já no século XX, a divulgação do pensamento científico abriu caminho para se intensificar a utilização dos processos matemáticos na música.

⁴⁹ Heinrich K Taube, *Notes from the Metalevel: an Introduction to Computer Composition* (Abingdon: Routledge, 2004). (p. 143).

⁵⁰ Curtis Roads, *The Computer Music Tutorial* (Cambridge: MIT Press, 1996). (pp. 822-823).

⁵¹ Hanna Järveläinen, “Algorithmic Musical Composition,” *Algorithmic Musical Composition* (Helsinki: Helsinki University of Technology, 2000). (p. 1).

Existem vários tipos de utilização que serão, já a seguir, explicados. Roads⁵² divide a música algorítmica em dois tipos distintos — música estocástica e determinista. Por sua vez, Maurer⁵³ designa estes dois tipos como música estocástica e música baseada em regras (*rule-based music*), respectivamente. A música estocástica utiliza uma série de números gerados por um processo algorítmico (feito com ou sem computador). Neste tipo de música, o compositor tem ainda muita liberdade relativamente para as suas decisões criativas. Em França, Pierre Barbaud⁵⁴ é considerado o inventor da música algorítmica. Desde os anos 1950, utilizou probabilidades na sua música e escreveu muitos textos teóricos sobre o assunto. Gottfried Michael Koenig é um compositor germano-holandês que, desde os anos 1960, fez experiências com música algorítmica. Uma das suas obras mais conhecidas é *Project 1*, de 1964, um programa para formalizar a estrutura de peças.⁵⁵ O segundo tipo, *rule-based music*, é baseado num conjunto de regras definidas pelo compositor, cujo exemplo paradigmático é o da música contrapontística, que segue as regras expostas por Johann Joseph Fux no seu livro *Gradus ad Parnassum*, de 1725. Neste tipo de música, o conjunto de regras contrapontísticas retira ao compositor grande parte da sua decisão criativa, cingindo-se esta a uma elaboração sobre a base motívica elementar — núcleo que depois será desenvolvido através de todo um processo de regras. Mais recentemente, Supper⁵⁶ divide em três tipos diferentes a música algorítmica baseada em regras:

- 1 — a modelação de processos compositivos tradicionais, não algorítmicos;
- 2 — a modelação de processos compositivos originais, diferentes dos anteriores;
- 3 — a utilização de algoritmos através de processos extra-musicais.

O primeiro tipo tenta copiar processos compositivos tradicionais, à semelhança do estilo de Johann Sebastian Bach (ou das regras contrapontísticas de Fux). O objectivo aqui é gerar peças

⁵² Curtis Roads, *The Computer Music Tutorial* (Cambridge: MIT Press, 1996). (pp. 822-823).

⁵³ John A Maurer, "A brief history of Algorithmic Composition," 1999 Março, john.a.maurer.iv, 2009 15 de Maio <<http://ccrma.stanford.edu/~blackrse/algorithm.html>>.

⁵⁴ Mais informação sobre Pierre Barbaud pode ser consultada em <http://www.associationpierrebarbaud.fr/>.

⁵⁵ Mais informação sobre Gottfried Michael Koenig pode ser consultada <http://www.koenigproject.nl/>.

⁵⁶ Martin Supper, "A few remarks on algorithmic composition," *Computer Music Journal* 5.1 (2001): 48-53.

que são semelhantes às do modelo original, mas criadas automaticamente com base em regras de composição pré-definidas. Implementações deste tipo são feitas, entre outros, por Shottstaedt⁵⁷ e McKay.⁵⁸ Ebcioğlu criou *Choral*,⁵⁹ um programa para harmonizar corais ao estilo de Bach. Em alternativa, pode gerar-se um novo conjunto das regras baseadas nos princípios musicais. Um pioneiro deste tipo é o americano Lejaren Hiller, que, em 1957, com o seu compatriota e matemático Leonard Isaacson, escreveu a *Illiad Suite*, um quarteto para cordas em quatro andamentos. Ambos programaram o computador para gerar números inteiros, que representavam vários parâmetros musicais, como altura, ritmo e dinâmica. Estes parâmetros seriam, depois, avaliados por compositores, que decidiam como deveriam ser utilizados os resultados computacionais.⁶⁰

2. O segundo tipo quer, em contraste com o primeiro, mostrar o algoritmo; isto é, o próprio algoritmo faz parte da manifestação concreta da música. Um exemplo é a peça para piano *Çogluotobüsisletmesi*, de Clarence Barlow, escrita em 1978. A intensidade métrica e harmónica, a uniformidade rítmica e melódica, a densidade dos acordes, dos ataques e da articulação — tudo isto foi calculado através de algoritmos. A obra, por conseguinte, é uma meta-estrutura composta. A sua forma final é apenas uma possibilidade, entre outras, de realização.⁶¹

3. Finalmente, o terceiro tipo utiliza processos extra-musicais para gerar material musical. Um processo interessante decorre da aplicação dos sistemas de Lindenmayer. O biólogo húngaro Aristid Lindenmayer concebeu uma linguagem formal nos finais dos anos 1960 — isto é, um conjunto de cordas ou uma sequência dos símbolos — para modelar o crescimento das plantas na natureza. Os sistemas de Lindenmayer são constituídos por duas partes essenciais: um axioma e

⁵⁷ Bill Schottstaedt, *Automatic Species Counterpoint STAN-M-19*, Stanford University (Stanford: Stanford University, 1984).

⁵⁸ Cory McKay, *SpeciesChecker: A system for automatically proofreading species counterpoint*, undergraduate thesis, University of Guelph (Guelph: University of Guelph, 2002).

⁵⁹ Kemal Ebcioğlu, “An expert system for harmonizing chorales in the style of J. S. Bach,” *The Journal of Logic Programming*, 8.1-2 (n.d.): 145-185.

⁶⁰ *Illiad Suite for String Quartet*, 2009, 2009 15 de Maio <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/282904/Illiad-Suite-for-String-Quartet>>.

⁶¹ Martin Supper, “A few remarks on algorithmic composition,” *Computer Music Journal* 5.1 (2001): 48-53.

focada na música electrónica. A empresa de Stephen Wolfram tem desenvolvido WolframTones,⁶⁶ uma aplicação que toma uma parte dum autómato celular e transforma-a em música, aplicando várias regras impostas pelo utilizador.

Capítulo 6 Técnicas para Utilização dos Autómatos Celulares

Se utilizarmos autómatos celulares (ou qualquer outro processo extra-musical) para criar material compositivo, precisamos dum modo de fazer corresponder os dados assim gerados aos elementos musicais. Tal processo, que tem a denominação inglesa de *mapping*, é realizado por meio de uma aplicação ou função. O desafio é encontrar uma forma sólida de aplicação que resulte numa composição credível e esteticamente interessante. Um autómato celular é um sistema dinâmico e complexo, com um rico potencial de comportamento. Para tal, o algoritmo efectuando a aplicação deveria ser feito de tal forma que fosse possível extrair várias séries de características, isto é, através do qual fosse possível fazer um análise crítica e estrutural do autómato.⁶⁷ Existem várias técnicas para aplicar dados dum autómato celular em parâmetros musicais. Os dados podem ser traduzidos em alturas, ritmos, dinâmicas, instrumentação, etc. Nas secções seguintes, serão apresentadas e comparadas várias formas de aplicação recorrendo a autómatos celulares. Primeiro, será abordada a aplicação dos autómatos uni-dimensionais. Seguir-se-á a aplicação dos autómatos bi-dimensionais. Finalmente, serão descritas observações sobre a aplicação destes dois tipos de autómatos.

⁶⁶ Wolfram Research, [Wolfram Tones an experiment in a new kind of music](http://tones.wolfram.com/), 2005, 2009 15 de Maio <<http://tones.wolfram.com/>>.

⁶⁷ Peter Beyls, “Cellular Automata Mapping Procedures,” [Proceedings of the International Computer Music Conference](#) (Miami: ICMA, 2004) 55-58.

6.1 Técnicas de aplicação em autômatos uni-dimensionais

6.1.1. Alturas

Uma forma de aplicar o conteúdo do autômato é atribuir a cada célula uma altura determinada. Pode ser uma altura cromática qualquer (como se fosse um *piano-roll* num sequenciador) ou integrada numa escala específica pré-determinada. De entre aqueles que usaram este último processo, Iannis Xenakis é talvez o mais conhecido. Atribuiu às células da sua peça para orquestra *Horos*, que será analisada no capítulo seguinte, as alturas duma escala sintética. Eis um exemplo (Fig. 29):

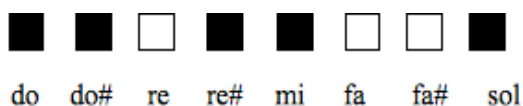


Figura 29. As células duma geração aplicadas em alturas: as células vivas (a preto) serão tocadas, de que resulta o acorde do – do# – re# – mi – sol

6.1.2 Ritmos

A linha dum autômato uni-dimensional pode ser vista como uma janela dum sequenciador. Se considerarmos um sequenciador cujo tempo é dividido em 16 partes (equivalente a um compasso com 16 semi-colcheias), então, num autômato com 16 células, cada célula terá o valor duma semínima. Se uma célula está viva, significa que nessa parte do tempo irá haver um ritmo. A minha peça para percussão *Descaótico*, apresentada em pormenor na terceira parte deste trabalho, utiliza a técnica de aplicação aos ritmos. Mostra-se agora um pequeno exemplo (Fig. 30):



Figura 30. As células duma geração aplicadas aos ritmos

6.1.3 Combinações de parâmetros

O compositor e cientista australiano Dave Burraston, que é uma autoridade no domínio da música generativa e da música com autômatos celulares, desenhou vários sistemas que utilizam

autômatos celulares para geração de música, como por exemplo o sistema CASS (Burraston, CASS – (Cellular Automata Simplistic Selector)).⁶⁸ O seu funcionamento é semelhante ao de um sequenciador com 8 vozes, estando a cada célula específica do autômato atribuída uma voz. Cada voz está ligada aos seguintes parâmetros: altura, dinâmica, duração, canal e programa MIDI. Se uma célula está viva, então os parâmetros atribuídos a essa célula vão ser activados, resultando em eventos musicais. Todos os parâmetros podem ser ligados ou desligados em tempo real pelo compositor. Isto permite uma justaposição interessante entre o executante/compositor e a máquina automatizada.

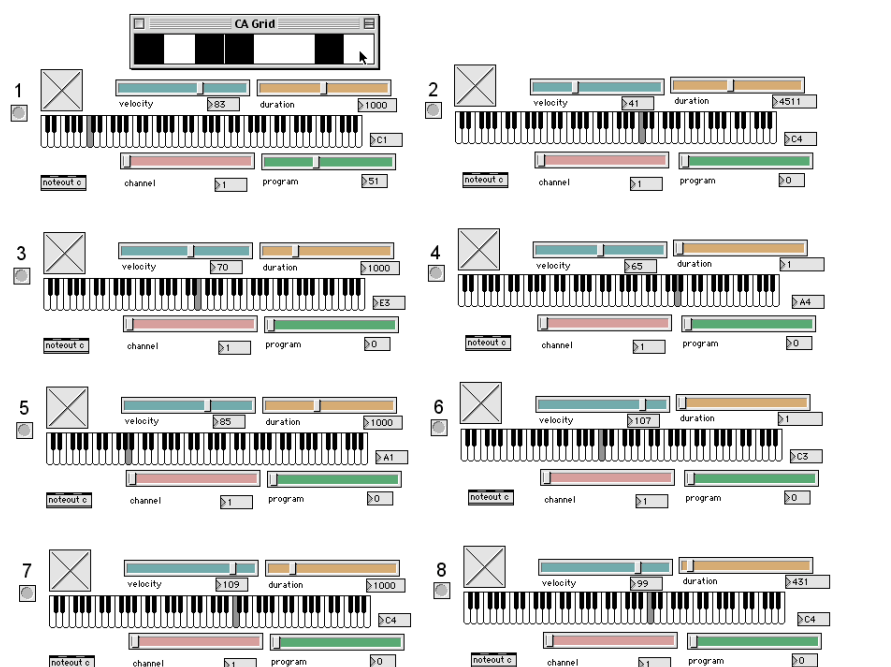


Figura 31. Uma imagem (fotografia instantânea) de CASS

6.2 Aplicar autômatos bi-dimensionais

Esta secção trata da aplicação em *O Jogo da Vida*, o autômato mais utilizado na música e, hoje em dia, o que está melhor documentado.

⁶⁸ Dave Burraston, "CASS – (Cellular Automata Simplistic Selector)," [Noyzelab](http://www.noyzelab.com/gensys/CASS/cass.html), 2009 15 de Maio <<http://www.noyzelab.com/gensys/CASS/cass.html>>.

6.2.1 Aplicação através de coordenadas (x, y)

Se utilizarmos autômatos bi-dimensionais, temos duas coordenadas (x, y) a considerar. A forma mais simples de aplicar células é a que se utiliza nos autômatos uni-dimensionais. Atribuímos a cada célula um evento — seja altura, ritmo, dinâmica ou outro parâmetro — e em cada geração temos um coleção de eventos musicais. Por exemplo, na minha peça *Orange Disco*, analisada na III parte, atribuí a cada célula uma nota. Cada geração nova resultou numa nova coleção de notas.

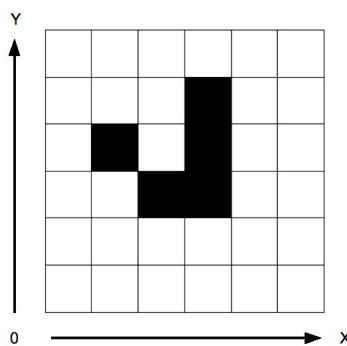


Figura 32. Aplicação (x, y) : as células $(2, 4)$, $(3, 3)$, $(4, 3)$, $(4, 4)$ e $(4, 5)$ estão vivas

O problema, agora, é o modo como cada compositor irá tratar esta coleção. Num autômato uni-dimensional, é natural tratar uma geração como um acorde e considerar o autômato total como um sequência de acordes. Num autômato bi-dimensional, este tratamento também é possível, mas o número de células é bem maior. Enquanto num autômato uni-dimensional com um tamanho de 8 células, o acorde mais denso é constituído por 8 notas, num autômato bi-dimensional com um tamanho de 8×8 células, o acorde mais denso pode (em teoria) ter até 64 notas. Se daí resultarem *clusters*, o compositor será obrigado a fazer muitas manipulações para gerir tantas notas.

Há duas soluções principais para resolver este problema. Na primeira, lê-se uma geração do lado esquerdo para o direito, como se fosse um sequenciador (cf. 6.1.2 “Ritmo”). Uma implementação prática é o programa *Cellular Beats* de Joseph Malloch. Nesta matriz de 32×40 células, um compositor tem apenas que colocar a configuração inicial das células. Ao eixo y , Malloch atribui

vários instrumentos de percussão, enquanto x é o eixo temporal, em que o programa lê o conjunto das células activas do lado esquerdo para o direito. A cada novo tempo (*beat*), ou momento da sequência (*timestep*), produz-se uma nova geração, o que resulta em acordes sempre diferentes. A par deste processo do autômato, o compositor pode ainda manipular a instrumentação, a velocidade e o tempo. O tempo de evolução do autômato pode ser diferente do tempo do sequenciador, o que leva a que o compositor tenha várias possibilidades de realizar o material da composição.

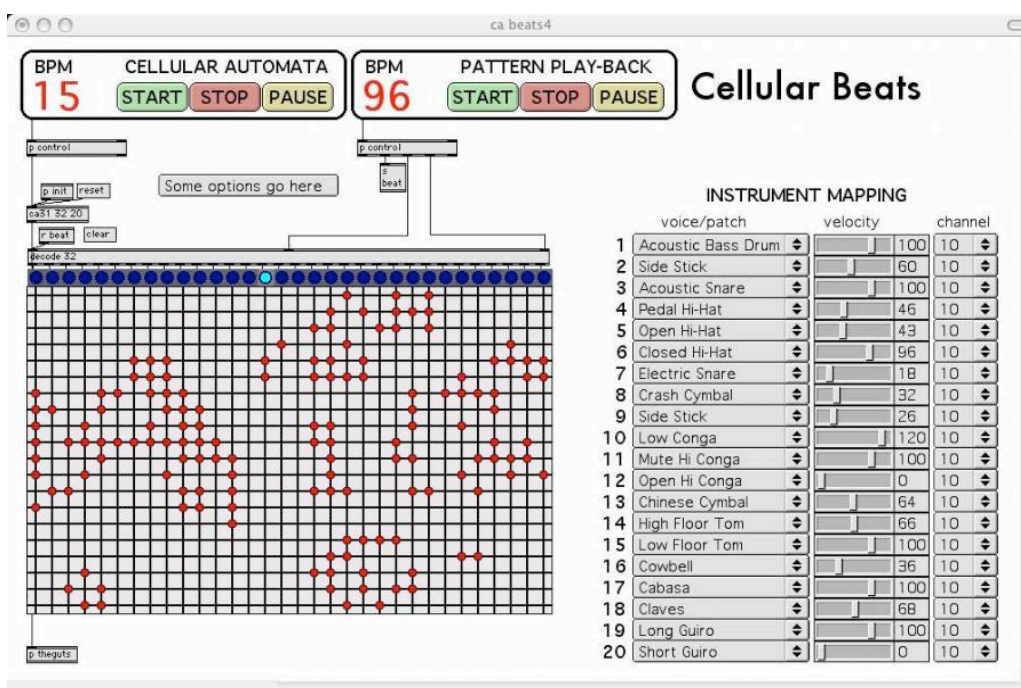


Figura 33. Uma imagem de Cellular Beats

Na segunda solução, apenas uma pequena parte do autômato é aplicada de cada vez. À semelhança do primeiro modo de aplicar as células, a evolução é feita em cada momento da sequência (*timestep*). Assim, temos uma nova colecção de eventos activados simultaneamente. A diferença é que apenas as células associadas a um evento sonoro serão tocadas. Por conseguinte, o compositor pode gerir mais facilmente o tamanho dos acordes. Uma implementação prática é o programa *Glitch Sequencer*, de Bret Truchan,⁶⁹ desenvolvido em

⁶⁹ Bret Truchan, [Glitch Sequencer Cellular automaton based MIDI sequencer](http://www.glitch-sequencer.com/), 2009, 2009 15 de Maio <http://www.glitch-sequencer.com/>.

Processing, um ambiente e linguagem de programação.⁷⁰ O compositor introduz apenas a configuração inicial, a semente, depois coloca *triggers* (para associar células a eventos sonoros) noutra janela. Quando uma célula está viva, o evento a ele associado será tocado.

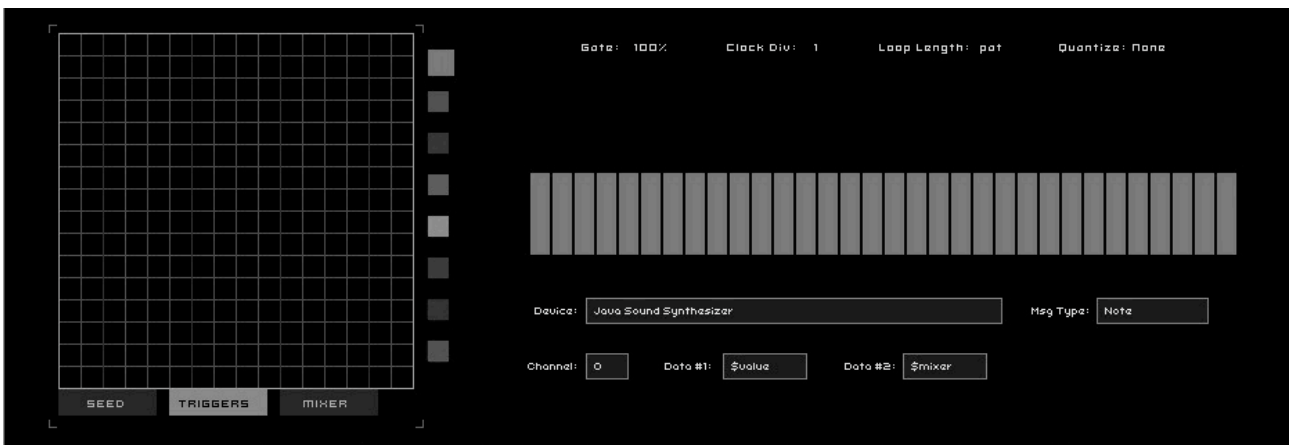
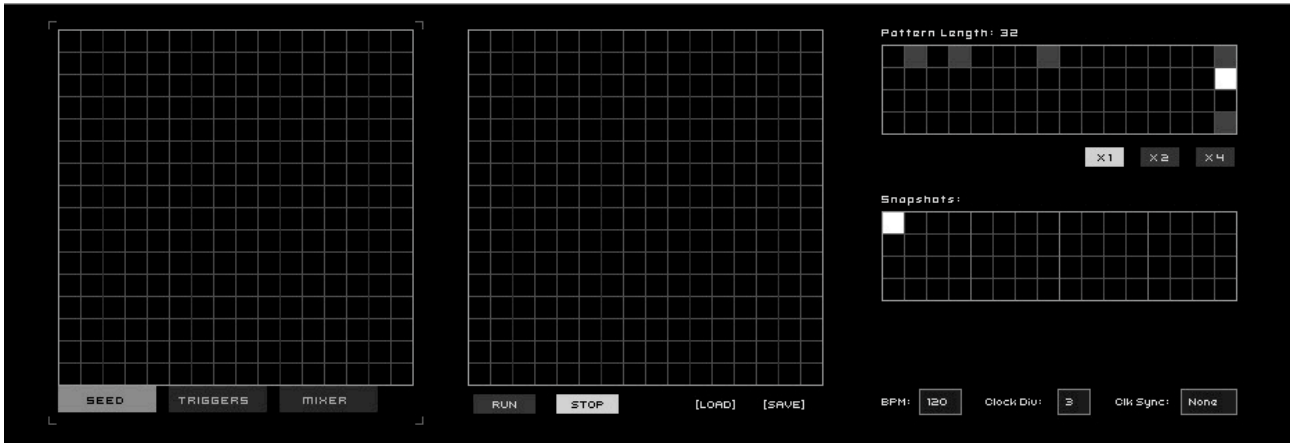


Figura 34. As duas janelas principais de Glitch Sequencer: na primeira, está colocado o padrão inicial; na segunda, os triggers

Foram apresentadas acima três modos diferentes de aplicar *O Jogo da Vida*, cada um tendo as suas vantagens e desvantagens. O primeiro traduz o autômato na sua totalidade, mas pode dar resultados difíceis de gerir. O segundo não tem a grande desvantagem de dar demasiada informação para gerir, mas traduz apenas uma parte do autômato. Finalmente, o terceiro tem em conta todo o autômato em cada actualização ou geração (isto é, a cada momento de evolução) e, para mais, o compositor tem controlo sobre quais as células que quer associar a eventos sonoros.

⁷⁰ Processing foi desenvolvido por Casey Reas e Ben Fry no MIT Media Lab. É um ambiente e linguagem de programação destinado às artes electrónicas e artes visuais. O ambiente está bem documentado no internet com um sitio próprio www.processing.org.

Esta parece, pois, ser a melhor solução, sobretudo por causa do controlo acrescido por parte do compositor. Em qualquer outra solução, de resto, o papel do compositor é o elemento decisivo: se o compositor não é criativo, não haverá boa música.

6.2.2 Aplicação baseada em coordenadas polares

As aplicações acima descritas são baseadas em coordenadas cartesianas (x, y) . N'O *Jogo da Vida*, surgem figuras simétricas ou semi-simétricas. Tais simetrias não serão ouvidas na música com a aplicação cartesiana, porque esta não mostra a relação entre as células. Kirke e Miranda⁷¹ propõem uma forma de aplicação baseada em coordenadas polares, isto é, baseada na distância entre qualquer célula e a célula central. Assim, declaram os autores, a simetria inerente pode ser melhor explicada. A cada célula no autômato será feita uma correspondência com base na sua coordenada polar (r, θ) .

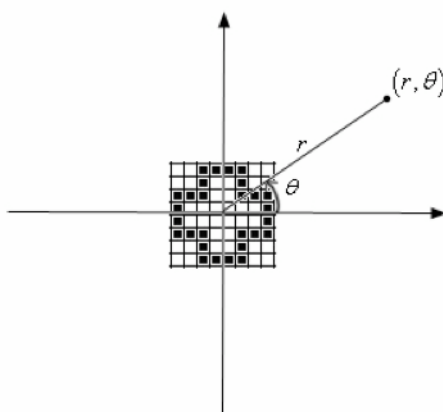


Figura 35. A aplicação baseada em radiais (segundo Kirke e Miranda 2007)

A figura a seguir mostra o resultado musical das duas primeiras gerações d'O *Jogo da Vida*.

⁷¹ Alexis Kirke e Eduardo Reck Miranda, "Capturing the Aesthetic: Radial Mappings for Cellular Automata Music," *Journal of the ITC Sangeet Research Academy* (2007): 15-23.



Figura 36. Em cima, as duas primeiras gerações d'O Jogo da Vida; em baixo, o resultado musical

Depois de introduzirem e demonstrarem “uma nova aplicação para gerar música a partir de autômatos celulares bi-dimensionais”, os autores concluem que “o sistema de coordenadas polares reflecte este elemento estético fundamental [a simetria radial inerente ao conjunto de regras] de grande parte d’*O Jogo da Vida*”.⁷²

6.3 Observações

Foram apresentadas, neste capítulo, várias formas de aplicação de autômatos celulares. A partir destas aplicações básicas, na sua forma crua, o compositor poderá refinar o processo. Existem várias aplicações para se utilizar autômatos celulares na composição musical. Duas delas, *Cellular Beats* e *Glitch Sequencer*, foram apresentadas como aplicações paradigmáticas. Em Burraston,⁷³ pode encontrar-se um estudo comparativo de grande número das aplicações possíveis.

⁷² Alexis Kirke e Eduardo Reck Miranda, “Capturing the Aesthetic: Radial Mappings for Cellular Automata Music,” *Journal of the ITC Sangeet Research Academy* (2007): 15-23. (p. 6) “We have introduced and demonstrated a new mapping for generating music from the 2D Cellular Automata Game of Life [. . .] and therefore we have argued that polar coordinate system captures this key aesthetic element [the radial symmetry inherent to the set of rules] of much of GL more precisely”.

⁷³ Dave Burraston, *Generative Music and Cellular Automata*, Doctoral Dissertation (Sidney: University of Technology, 2006).

No domínio da música, em geral, há dois tipos principais de utilização dos autómatos celulares: o da síntese de som e o da composição. Informação sobre a síntese de som pode encontrar-se em Serquera e Miranda⁷⁴ e Dahlstedt.⁷⁵ O outro tipo, o da utilização composicional, é precisamente o foco essencial da minha Tese.

Capítulo 7 *Horos*: Uma Obra Exemplar

Os autómatos celulares foram utilizados em vários domínios da arte, quer seja nas artes plásticas, nas artes visuais ou no áudio-visual. Exemplo duma obra áudio-visual é *Little Life*, escrita em 2006 pelo compositor português Rui Dias.⁷⁶ Contudo, prefiro debruçar-me agora sobre a aplicação dos autómatos celulares à música instrumental, onde escasseia a composição e a investigação. Um dos compositores que utilizou algoritmos na música instrumental, e porventura o mais conhecido de todos, é Iannis Xenakis, cuja peça para orquestra *Horos* será de imediato apresentada e analisada.

7.1 O que levou Xenakis a utilizar autómatos celulares na sua música?

Nas suas peças *Horos* (1986) e *Ata* (1987), Xenakis utiliza frequentemente autómatos celulares. *Horos* constitui, na realidade, a sua primeira utilização. O compositor apresenta duas razões fundamentais para explicar a utilização de autómatos celulares na música. Primeiro, no prefácio do seu livro *Formalized Music*:

“É na base destes crivos [de notas] que os autómatos celulares podem ser úteis em progressões harmónicas que criam novas e ricas fusões tímbricas com instrumentos orquestrais.”⁷⁷

⁷⁴ Jaime Serquera e Eduardo Reck Miranda, “Cellular automata sound synthesis: from histograms to spectrograms,” *Automata 2008: Theory and Applications of Cellular Automata*, ed. R. Alonso-Sanz, e A. Lawniczak A. Adamatzky (Frome: Luniver Press, 2008) 368-377.

⁷⁵ Palle Dahlstedt, “Evolution in Creative Sound Design,” *Evolutionary Computer Music*, ed. E. R. Miranda e J. A. Biles (London: Springer, 2007) 79-99.

⁷⁶ Rui Dias, “Little Life: Installation Submission,” (NIME, 2006).

⁷⁷ Iannis Xenakis, *Formalized Music*, ed. S. Kanach, trans. G. H. Hopkins, J. Challifour C. Butchers, 2ª (Stuyvesant: Pendragon Press, 1992). (p. xii) “It is on this basis of sieves that cellular automata can be useful in harmonic progressions which create new and rich timbric fusions with orchestral instruments”.

Depois, nas suas conversas com Varga:⁷⁸

“O método [autómatos celulares] ajuda a decidir como se passa das notas dum acorde para as doutro, dentro duma estrutura racional, perceptível. Digamos que há uma matriz no ecrã com linhas verticais e horizontais formando quadrados pequenos, isto é, células. Estes quadrados estão vazios. Cabe ao compositor (quer esteja a trabalhar com imagens ou com sons) preenchê-los. Como? Uma forma é através das probabilidades, por exemplo, utilizando a distribuição de Poisson, como eu fiz há 30 anos em *Achorripsis*. Há também uma outra forma, com a ajuda duma regra que cada um elabora para si próprio. Suponhamos que as linhas verticais representam uma escala cromática, ou meios-tons, quartos-de-tom, etc. Qualquer tipo. Começa-se num dado momento, isto é, na linha vertical determinada, com uma dada altura – por outras palavras, uma célula – e diz-se: aqui há uma nota tocada por um instrumento atribuído. Como vai ser o próximo momento? Quais as notas? De acordo com essa regra própria, a célula que foi preenchida origina, digamos, uma ou duas células adjacentes. No passo seguinte, cada célula irá criar uma ou duas notas. A nossa própria regra ajuda a preencher toda a matriz. Estes são os autómatos celulares”.⁷⁹

O compositor Peter Hoffmann investigou os processos algorítmicos utilizados na música de Xenakis e considerou-o um grande promotor da “arte automatizada”. Durante toda a sua carreira de compositor, Xenakis investigou a criação do que poderiam ser “robots que compoem”. O objectivo final era o de tornar possível ao computador a realização dum processo compositivo. Hoffman resume assim a importância deste projecto:

“Dado o seu interesse em questões relacionadas de computação, durante toda a sua vida, a utilização que Xenakis faz dos autómatos celulares em *Horos*

⁷⁸ Balint Andras Varga, *Conversations with Iannis Xenakis* (London: Faber and Faber, 1996). (p. 200).

⁷⁹ Makis Solomos, “Cellular Automata in Xenakis’ Music Theory and Practice,” *Definitive Proceedings of the International Symposium Iannis Xenakis*, ed. S. Georgaki, Solomos M. e G. Zervos (Athena, 2005) 120-138.

“The method [cellular automata] helps in deciding how to go from the notes of one chord to those of another within a rational, perceptible structure. [...] Let’s say you have a grid on your screen, with vertical and horizontal lines forming small squares, that is, cells. There are empty. It’s for the composer (whether working with pictures or with sounds) to fill them. How? One way is through probabilities, for instance by using the Poisson distribution, as I did 30 years ago in *Achorripsis*. There’s also another way, with the help of a rule that you work out for yourself. Let’s suppose the vertical lines represent a chromatic scale, or semitones, quarter-tones and so on. Any kind. You start at a given moment, that is, at the given vertical line, at a given pitch – in other words, a cell – and you say: here’s a note played by an assigned instrument. What’s the next moment going to be? What notes? In accordance with your rule, the cell which has been filled gives birth to say, one or two adjacent cells. In the next step each cell will create one or two notes. Your rule helps to fill the entire grid. These are the cellular automata”.

pode, por conseguinte, ser compreendida como uma demonstração implícita da força e da limitação da computação universal na composição musical”.⁸⁰

7.2 Como utiliza Xenakis os autómatos celulares em *Horos*?

Observemos, primeiro, as alturas utilizadas. Através dum crivo — isto é, uma sequência de números que pode ser aplicada em alturas, ritmos ou outros parâmetros musicais — Xenakis criou uma escala de 23 notas. Estas são aplicadas nas células dum autómato uni-dimensional. O conjunto das células activas numa geração (cf. 6.1.1 “Alturas”) constitui o acorde. O crivo aqui utilizado — com a conotação sonora das obras que Xenakis criou desde o fim da década de 1970 — tem o carácter duma escala javanesa *pelog*, com duas quartas concatenadas, ou entrelaçadas: as notas 12-15 e 14-17, como adiante se representa (Fig. 37). Este crivo é muito utilizado durante a peça, mas outros estão também presentes, por vezes alargados ao registo mais profundo e/ou ao mais alto.⁸¹

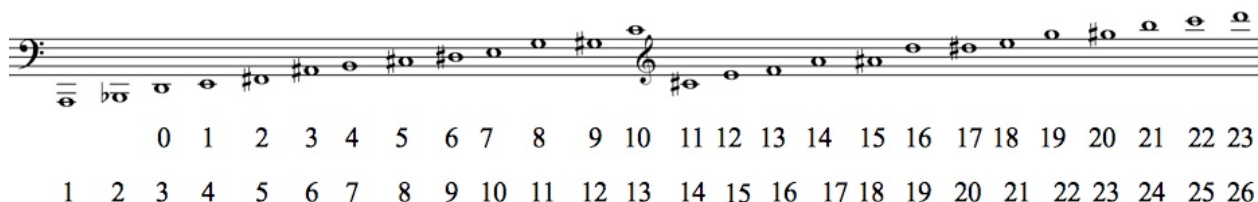


Figura 37. O crivo que Xenakis utilizou: as duas numerações representam diferentes centros tonais

Solomos observa que Xenakis não utilizou autómatos ao longo de toda a peça, admitindo nela, portanto, liberdades, ou hiatos (*écarts*), onde o compositor intervém manualmente no processo. Ele aplica esta prática em muitas das suas peças. Quando não gosta do resultado não procura uma forma de melhorar o processo matemático, mas utiliza os resultados obtidos alterando-os, para se tornarem esteticamente satisfatórios.

⁸⁰ Peter Hoffman, “Towards an Automated Art: Algorithmic Processes in Xenakis’ Compositions,” *Contemporary Music Review* 21.2-3 (2002): 121-131. (p. 124). “[Xenakis’ use of CA can be] understood as an implicit demonstration of the strength and limitation of universal computation in musical composition”

⁸¹ Makis Solomos, “Cellular Automata in Xenakis’ Music Theory and Practice,” *Definitive Proceedings of the International Symposium Iannis Xenakis*, ed. S. Georgaki, Solomos M. e G. Zervos (Athena, 2005) 120-138.

Qual a regra que utilizou Xenakis? A anotação (4200410), que se encontra no compasso 10, é parte do código completo (2004104200410) que identifica a regra do autômato uni-dimensional. Burraston⁸² classifica-o como um autômato “totalístico”, em que o estado da célula no tempo $t + 1$ depende dos estados das células vizinhas. A regra utiliza uma vizinhança de 3 células (a célula central e as células de ambos os lados) e de 5 estados. Para além disso, Burraston pensa que Xenakis utilizou extremos fixos, em vez de periódicos (cf. 2.3 “Condições dos Extremos do Autômato”). Solomos acrescenta-lhe duas características:

1. A coluna do lado direito não interfere com o cálculo da linha seguinte.
2. As anotações escritas na coluna da esquerda são adicionadas manualmente pelo compositor.

São estas as condições da regra:

- O estado dum célula no tempo $t + 1$ é igual ao da célula no tempo t e dos estados das duas células laterais.
- Há uma transformação desta soma, que é realizada através dum número de código (*code number*) do autômato. Nesta peça, é (4200410). O sentido deste número é o seguinte:
 - se a soma (da primeira condição) é igual a 0, o estado da célula será 0;
 - se a soma é igual a 1, o estado da célula será 1;
 - se a soma é igual a 2, o estado da célula será 4.

O autômato referido acima tem 5 estados, e a cada um é atribuído um grupo instrumental. Os estados e os grupos são: **1** — metais, **2** — madeiras, **4** — cordas. Ao estado **0** é atribuído o silêncio, ao passo que não existe um estado 3. Eis a reprodução do autômato (Fig. 38).

⁸² Dave Burraston, “One Dimensional Cellular Automata Musical Experiments with Max,” Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction (Las Vegas: HCI International, 2005).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
bar 10	1										1													
	2										1	1	1											
	3									1	4		4	1										
	4								1	2	2	1	2	2	1									
	5								1	2	2	2	2	2			1							
	6							1	1			4	4	4			1	1						
	7					1	4	4	1		1	2	1			1	4	4	1					
	8				1	2	4	4	2	4					4	2	4	4	2	1				
	9				1						4				4							1		
	10			1	1	1														1	1	1		
	11		1	4		4	1										1	4			4	1		
	12		2	2	1	2	2	1								1	2	2	1	2	2	1		
	13			2	2	2	2		1							1		2	2	2	2	2		4
	14		4		4	4			1	1						1	1			4	4		4	
	15			1	1	1		1	4	4	1				1	4	4	1		1	1	1		
	16		1	4		4	4	2	4	4	2	1		1	2	4	4	2	4	4		4	1	
bars 14-15	17		2	2	1	1						4							1	1	2	2	1	
	18	4		2		4	1											1	4		2		4	
	19		4	4	4	2	2	1									1	2	2	4	4	4		
	20		1	2		1	2		1							1		2	1		2	1		
	21	1							1	1					1	1							1	
	22						1	4	4	1				1	4	4	1							
	23					1	2	4	4	2	1		1	2	4	4	2	1						
	24					1							4								1			
	25					1	1	1										1	1	1				
	26					1	4		4	1							1	4		4	1			
	27			1	2	2	1	2	2	1					1	2	2	1	2	2	1			
	28	1		2	2	2	2	2		1					1		2	2	2	2	2		1	
	29		4		4	4	4			1	1				1	1			4	4	4		4	
	30			1	1	2	1		1	4	4	1		1	4	4	1		1	2	1	1		
	31			1	4				4	2	4	4	2	4	2	4	4	2	4			4	1	
	32	1	2	2				4					1					4				2	2	
	33	1			4							1	1	1							4			

Figura 38. Reprodução do autômato utilizado nos cc. 10 e 14-15

Afinal, onde utilizou Xenakis o autômato? No c. 10, são apresentadas as primeiras 16 gerações do autômato, cada uma com a duração de semi-colcheia. O que é interessante na utilização deste autômato são as mudanças rápidas de instrumentação. Nos cc. 11-13, Xenakis volta a utilizar elementos dos cc. 1-9, isto é, homofonia estática com acordes mais lentos. No c. 14, o autômato continua, mas com ritmos irregulares e mais lentos. No fim do c. 15, ao cabo da 31ª geração, o autômato deixa de ser utilizado.

Nos cc. 16-18, o autômato recomeça todo o processo desde a primeira geração (c. 10), mas adicionando agora uma coluna ao lado direito. Assim, há mais uma nota disponível, que corresponde ao número 23 (segundo a numeração da linha superior da figura 37). Contudo, o ré grave desaparece. Duas razões parecem explicar por que Xenakis volta ao início do autômato:

primeiro, o autómato retoma normalmente a configuração inicial, 31 gerações volvidas; depois, o resultado sonoro será diferente pelo simples facto de adicionar uma coluna (ou nota) ao autómato.

Solomos observa que Xenakis utilizou aqui o princípio de *bricolage*, não lendo o autómato de maneira sequencial desde o início, mas decidindo lê-lo de maneira subjectiva:

1. Os acordes 32-59 correspondem às gerações 17-44.
2. O acorde 27 é uma inversão do crivo, que deve ser lido da nota aguda à grave (começando com o número 21 da figura 37).
3. Não podem ser definidos os acordes 23 e 31-32 .
4. No acorde 30, todas as células do autómato estão activas, sendo utilizadas as notas do registo médio.

Solomos explica ainda a razão prática que levou à utilização do processo de *bricolage*. Os metais podem tocar apenas 16 notas, de entre as 22 notas possíveis do autómato. Por isso, relativamente às notas mais agudas, Xenakis recorre por vezes a uma metamorfose (*metabolè*), lendo o autómato em sentido inverso. Nos cc. 67-72, para acabar a secção, o compositor interfere nos resultados do cálculo: em vez de continuar o autómato, prefere recombinar, nos metais, 16 acordes anteriores. Parece haver aqui uma motivação de carácter formal, com o retorno a uma textura homofónica, menos dinâmica, utilizada no início da peça.

Por que razão utilizou Xenakis a regra acima descrita? A hipótese de Solomos,⁸³ que é partilhada por Burraston,⁸⁴ é a de que esta regra apareceu num artigo de Wolfram⁸⁵ na revista *Scientific American*, da qual Xenakis era um leitor habitual. Nenhum deles tem a certeza desta influência, porque a revista não existe nos arquivos de Xenakis.

⁸³ Makis Solomos, "Cellular Automata in Xenakis' Music Theory and Practice," *Definitive Proceedings of the International Symposium Iannis Xenakis*, ed. S. Georgaki, Solomos M. e G. Zervos (Athena, 2005) 120-138.

⁸⁴ Dave Burraston, *Generative Music and Cellular Automata*, Doctoral Dissertation (Sidney: University of Technology, 2006).

⁸⁵ Stephen Wolfram, "Universality and complexity in cellular automata," *Physica D* 10.1 (1984): 1-35.

Por sua vez, Hoffman observa que há erros na peça. Investigando a partitura, encontrou 20 notas, num total de 550 (ou seja 3,6 %), que não estão no lugar certo. Uma vez que a estrutura da peça é muito rígida, estes erros não parecem ser feitos intencionalmente. O mais provável é que se trate de erros de cópia por parte do compositor, enquanto estava a ler o autômato.

Nas páginas seguintes, mostra-se o fragmento da partitura (Fig. 39) onde está presente a primeira utilização dos autômatos celulares (cc. 10-18).

The image displays two pages of a handwritten musical score. The top page is numbered '10' at the beginning and '13' at the end, with a page number '- 2 -' centered. It features staves for Flute (Fl), Horn (Hb), Clarinet (Cl), Bassoon (Fg), Cello (C), Trumpet (TP), Trombone (TB), Violin (VI), Viola (VII), Violoncello (VA), and Contrabasso (VC). The score includes various musical notations such as notes, rests, and dynamic markings. A 'Tutti: (ff)' marking is present at the bottom of the page. The bottom page is numbered '13' at the beginning and '16' at the end. It continues the musical score with the same instruments. A 'Tutti: (ff)' marking is also present, followed by a 'subito' marking. The notation is dense and characteristic of a complex, rhythmic composition.

- 3 -

($\downarrow \approx 40 \text{ MM}$)

=

($\downarrow \approx 36 \text{ MM}$)

Figura 39. Horos: fragmento da partitura (cc. 10-18)

7.3 Análise integral da peça

Na continuação da obra, Xenakis utilizou de novo autômatos celulares nos cc. 67-72. Esta parte foi já analisada pormenorizadamente por Solomos. Apresento agora uma análise descritiva do resto da peça, de modo a oferecer ao leitor uma perspectiva global. No c. 19, inicia-se um *ostinato* nas cordas, enquanto aos sopros são atribuídos acordes de duração irregular. Nos cc. 23-27, há uma breve passagem polifónica, regressando depois (até ao c. 40) ao *ostinato* e a acordes

polirrítmicos. Entretanto, no c. 35, há um efeito de duplo contraponto: o *ostinato* passa para os sopros e, inversamente, os acordes para as cordas. Nos cc. 40-43, a orquestra adota uma textura homorrítmica. A seguir, o duplo processo anterior — *ostinato* e acordes de duração irregular — vai aplicar-se apenas aos sopros, reaparecendo as cordas nos cc. 47-52. A secção dos cc. 51–52 utiliza um processo de imitação, canónico, mas com distâncias irregulares. No c. 61, inicia-se uma nova secção, com acordes longos, lembrando o início (cc. 1-9): estes acordes são perturbados por ritmos mais curtos, havendo constantes mudanças de timbre. No c. 82, a orquestra inicia uma subida gradual: todas as cordas tocam em *glissando* (um elemento característico na música de Xenakis) e os sopros tocam melodias. Nos cc. 85, 88 e 91, apenas as flautas, oboés e clarinetes tocam essas melodias; os outros sopros tocam acordes sustentados. Gradualmente, os *glissandi* são substituídos por melodias e, no c. 94, ouvem-se linhas melódicas em todos os instrumentos da orquestra: esta polifonia resulta numa sonoridade densa e cheia de energia. No c. 98, os instrumentos entram de novo canonicamente, mas agora à distância duma semi-colcheia, e surge uma polifonia a 23 partes, que vai atingir um clímax no c. 106. No c. 109, inicia-se um processo de cânones polirrítmicos nos oboés e nos clarinetes: as alturas correspondem às notas 8-15 do crivo, tudo transposto à oitava superior; os outros sopros entram em frases entrelaçadas, e no mesmo registo, o que resulta numa “textura contínua” (Harley, 2004, p. 179). A secção final começa no c. 121, quando regressam os acordes, mas com duração diferente; estes tinham aparecido pela primeira vez no c. 19, mas agora são acompanhados por melodias mais curtas. Assim, do ponto de vista formal, o fim da peça reflecte o seu início, havendo “uma proliferação celular de combinações instrumentais, com cruzamentos das vozes oscilantes da polifonia a 23 vozes e com a distribuição caleidoscópica de ímpetos mais rápidos”.⁸⁶

Xenakis reutilizou partes desta peça em *Ata*, também para orquestra, composta em 1987, logo a seguir a *Horos*. Os cc. 10, 14, 16 e 17 são reutilizados integralmente na nova peça, embora os três primeiros sejam escritos agora em movimento retrógrado. É de assinalar esta inversão da

⁸⁶ James Harley, *Xenakis. His Life in Music* (New York: Routledge, 2004). (p. 180). “With its cellular proliferation of instrumental combinations, is reflected at the end in meandering voice crossings of the twenty-three-layer counterpoint and the kaleidoscopic distribution of faster outbursts”

ordem temporal, já que a evolução do autômato tem apenas um sentido, não podendo ser invertida no tempo. “Realmente, tal como um deus, um compositor pode criar a reversibilidade dos fenômenos das massas, e aparentemente, inverter a ‘seta do tempo’ de Eddington”⁸⁷ — eis uma frase lapidar do compositor, que bem “poderia referir-se a um exemplo semelhante ao [movimento] retrógrado destas sequências do autômato [em *Ata*], porque são modelos discretos de sistemas físicos”.⁸⁸

Em suma, *Horos* é uma composição esteticamente muito interessante e tecnicamente inovadora: foram criadas novas sonoridades, em particular, através da mudança rápida e constante de timbres. Esta técnica, por sua vez, é uma consequência da utilização dos autômatos celulares. Embora Xenakis não os tenha utilizado muito nesta obra, a sua abordagem criativa é uma fonte de inspiração para outros compositores.

⁸⁷ Iannis Xenakis, *Formalized Music*, ed. S. Kanach, trans. G. H. Hopkins, J. Challifour C. Butchers, 2ª (Stuyvesant: Pendragon Press, 1992). (p. 255) “Indeed, much like a god, a composer may create the reversibility of the phenomenon of masses, and apparently, invert Eddington’s ‘arrow of time’”.

⁸⁸ Peter Hoffman, “Towards an Automated Art: Algorithmic Processes in Xenakis’ Compositions,” *Contemporary Music Review* 21.2-3 (2002): 121-131. (p. 126). “He [Xenakis] could have been referring to an example like the retrograde of these automaton sequences, because they are discrete models of physical systems”

III PARTE

TRÊS ESTUDOS DE CASO

Esta última parte mostra a aplicação dos autómatos na composição musical em três das minhas peças (compostas durante o mestrado) e que serão apresentadas como estudos de caso. As composições utilizam os autómatos em vários parâmetros musicais: ritmos, alturas, dinâmicas, etc. A sua escrita não correu sem problemas, como adiante se verá. Para cada peça, irei mostrar o conceito geral — e a sua transformação em música — fazer uma análise das várias secções, identificar os problemas que encontrei e os elementos que posso melhorar, concluindo depois com uma reflexão auto-crítica. Serão apresentadas as composições por ordem cronológica:

1. *Orange Disco*, para dois pianos.
2. *Descaótico*, para dois percussionistas (set-up 1 e 2, marimba e vibrafone).
3. *Kracht*, para grande orquestra.

As partituras das três composições encontram-se sob forma de PDF no CD-ROM anexado no fim da Tese.

Capítulo 8 *Orange Disco*, para Dois Pianos

8.1 Conceito geral

Orange Disco foi escrita utilizando o autómato celular *O Jogo da Vida* como fonte de material harmónico. A partir da figura *R-Pentomino* como configuração principal, traduzi a evolução do autómato em alturas. Cada célula tem uma nota que lhe é atribuída. Assim, cada vez que uma célula específica está viva, uma nota é activada. Era meu objectivo principal utilizar todas as notas/células de cada geração num mesmo compasso. Daí, a extensão da peça ser de 323 gerações/compassos, que é número onde acaba a evolução da configuração inicial.



Figura 40. As primeiras 5 gerações d'O Jogo da Vida, começando com o R-Pentomino. A evolução toda pode ser vista num patch em Max/MSP, incluído no disco.

Infelizmente, algumas gerações davam-me grupos de 120 notas, e até mais, o que é manifestamente excessivo para um só compasso. Impunha-se-me, portanto, escolher notas subjectivamente. Para além disso, utilizei grafismos de densidade harmónica para distinguir as diferentes secções. Depois de escrever toda a peça segundo regras impostas por mim próprio — rigorosamente — reproduzi a música em computador e avaliei-a esteticamente. A sonoridade geral da peça é marcada pela utilização de harmonias densas, mas tendo em conta um resultado que julgo ser musicalmente interessante. Eis algumas características da peça, que definem a sua sonoridade específica:

- Percurso gráfico das alturas;
- Utilização de acordes com ênfase nas sétimas maiores e menores;
- Utilização de *clusters* em contraste com acordes espaçados;
- Utilização do pedal para obter notas que vibram por simpatia, embora não pensadas como harmonia espectral;
- Notas e acordes longos para obter sonoridades que evoluam durante este tempo.

8.2 Breve descrição da obra

A peça tem 12 secções diferentes. Cada uma tem um carácter específico por causa do tratamento das células do autómato, através dum percurso gráfico das alturas, da sua filtragem ou não-filtragem.

1) cc. 1-5: introdução.

2) cc. 6-52: percurso gráfico do grupo das alturas.

- 3) cc. 53-85: abertura do registo, começando no registo médio e alargando gradualmente, como se fossem dois filtros de passagem de frequência (*band-pass filters*).
- 4) cc. 86-109: a abertura da secção anterior atinge a nota *Dó⁸⁹* pela primeira vez; nesta secção, só os registos extremos são utilizados, para lhes dar o máximo de atenção.
- 5) cc. 109-124: transição, acelerando até o fim.
- 6) cc. 125-150: começa-se com *clusters*, daí surgindo harmónicos, com os quais se misturam as notas isoladas que depois são tocadas, dando uma sonoridade complexa.
- 7) cc. 151-160: transição, baseada num acorde que tinha sido utilizado na secção 3.
- 8) cc. 160-210: tem várias subsecções.
 - a) cc. 160-181: embora os materiais sejam semelhantes aos da secção 6, a sua sonoridade é diferente; os *clusters* são tocados em *piano* (não em *forte*) e, assim, as notas isoladas não se misturam.
 - b) cc. 181-210: escrita mais rítmica, com mais movimento, subdividida internamente (cc. 181-89,190-200).
 - c) cc. 201-210: última parte.
- 9) cc. 210-233: utilização exclusiva do registo mais agudo.
- 10) cc. 234-277: percurso gráfico das alturas disponíveis.
- 11) cc. 278-301: acordes reverbantes que foram utilizados anteriormente durante a peça.
- 12) cc. 302-325: variação do secção 1, apenas uma lembrança do início, decrescendo progressivamente até ao fim e acabando com uma só nota.

8.3 Problemas encontrados e elementos a melhorar

Como *Orange Disco* foi a primeira peça em que utilizei autómatos celulares, não tinha ainda experiência suficiente com esses processos. Assim, naturalmente, surgiram alguns problemas imprevistos.

⁸⁹ Consideramos *Dó³* como *Dó central*

Matriz demasiado grande

O autômato utiliza uma matriz de 40 x 30 células, perfazendo um total de 1.200. Foi minha intenção obter um comportamento caótico. Por consequência, algumas gerações tinham 120 células vivas, resultando numa massa sonora de 120 notas. Sabendo-se que isto é demasiada informação em tão pouco tempo para o ouvinte, tinha de eliminar notas destes grupos para fazer uma peça musicalmente interessante. Sistematizei este processo para cada secção, embora escolhendo a extensão de cada uma subjectivamente.

Um outro problema que surgiu por causa do tamanho da matriz era a redundância das notas. Uma vez que o registo do piano abrange 88 notas diferentes, tinha de atribuir uma mesma nota a várias células. Desta maneira, afastei-me um pouco da minha ideia original de transformar *O Jogo da Vida* em música.

Método de aplicação utilizado resulta em demasiada informação

A ideia de transformar *O Jogo da Vida* em música é bastante interessante; no entanto, temos de ter em conta que estamos a trabalhar com uma fonte gráfica, não musical. Se podemos ver imagens num mili-segundo apenas, instantaneamente, a nossa experiência da música implica necessariamente a dimensão temporal. É este o maior desafio para um compositor.

A aplicação aleatória que utilizei na minha peça mostrava, com poucas notas apenas, dar combinações sonoras interessantes. Perdiam-se, todavia, quando surgiam as grandes massas sonoras. Daí, ter utilizado os processos acima descritos para obter um resultado musicalmente interessante.

8.4 Conclusão

É no sentido de melhorar o resultado musical em obras futuras que venham a utilizar *O Jogo da Vida*, que proponho as seguintes soluções:

- Utilizar uma matriz de menor dimensão, evitando assim demasiadas células activas.
- Procurar uma aplicação melhor, não escolhida aleatoriamente, mas que tenha uma estrutura gráfica interessante.

Em suma, poderia avaliar *Orange Disco* como uma experiência interessante que faz parte dum processo de aprendizagem da aplicação de autómatos celulares na composição musical. Como se tratava da minha primeira peça, havia alguns problemas que foram resolvidos com a intuição de compositor, não de forma sistemática. A subjectividade desempenhou aqui um papel crucial, maior do que o pensamento objectivo, para obter um resultado musicalmente interessante.

Capítulo 9 *Descaótico*, para Dois Percussionistas

9.1 Conceito geral

Depois de ter escrito a peça anterior, para dois pianos, uma nova etapa começou, em que tentei aprofundar os meus conhecimentos dos autómatos. O maior problema encontrado foi o tamanho do autómato, como vimos acima, cuja dimensão excessiva forneceu uma massa de dados difícil de gerir. A minha solução foi utilizar um autómato mais limitado, uni-dimensional, ao contrário d'*O Jogo da Vida*, que é bi-dimensional. Foi deste modo que consegui limitar a massa potencial de células vivas, tornando mais fácil o tratamento do autómato. Como utilizei um autómato limitado a 31 células, criou-se assim um reservatório de informação controlável.

Outra grande diferença em relação à primeira peça, para além da formação instrumental, foi a tradução diferente do autômato. Tendo as células sido tratadas antes como alturas, são agora traduzidas em ritmos. Nesta peça, cada célula viva representa a entrada duma nota.

Numa geração, cada linha de células representa um hiper-compasso de 31 colcheias. Para facilitar a leitura da partitura, cada uma destas grandes unidades métricas foi subdividida em 7 compassos menores, definidos como uma simetria invertida à volta dum centro único (1/8) (Fig. 41).

7/8	5/8	3/8	1/8	3/8	5/8	7/8
-----	-----	-----	------------	-----	-----	-----

Figura 41. A grande unidade (hiper-)métrica dividida em 7 partes menores

9.2 Análise da obra

9.2.1 Plano geral

A composição divide-se em duas partes quase simétricas. A primeira parte utiliza as 16 gerações iniciais de regra 126, cuja representação gráfica é uma figura sempre a crescer simetricamente, e que se mantém como tal, tendo alguma semelhança com o triângulo de Sierpinski. A segunda parte utiliza as 16 gerações iniciais da regra 86, mas graficamente invertida: isto traduz-se musicalmente numa inversão da ordem temporal, de modo que a 16ª geração (a última) aparece em primeiro lugar. Da combinação das duas partes resulta uma figura (ou plano) geral com contornos simétricos, começando e acabando com uma só célula. Essa figura, abrindo e fechando como triângulos invertidos que se justapõem pela base, contrasta com as gerações individuais das células, cuja figura (ao nível do hipercompasso) fecha e abre como triângulos invertidos que se tocam pela ponta.

A diferença entre as duas partes é também caracterizada pelo tratamento dos eventos sonoros. Na primeira parte, utilizei um padrão rítmico para a percussão 2, enquanto a percussão 1 executa os eventos sonoros cujo ataque é controlado pela regra 126. Na segunda parte, os dois

percussionistas executam os eventos sonoros, ora juntos ora individualmente, resultando numa sonoridade que parece aleatória e que contrasta com a da primeira parte.

9.2.2 Análise da primeira parte

Na primeira parte, a percussão 1 segue rigorosamente a imagem do autômato, isto é, para cada célula viva existe um evento sonoro. Para evitar longos silêncios que advêm dessa aplicação automática, adicionei um parte mais livre, na percussão 2, que executa uma figura rítmica variada, sempre de forma simétrica: os primeiros 3 compassos de cada geração são invertidos nos últimos compassos correspondentes. Embora de execução livre, a percussão 2 baseia-se no contorno do autômato. Processo adicional é também a entrada dos *temple blocks* no fim de cada geração. Do lado direito, é introduzida sempre uma nota em cada geração, empurrando a figura inicial mais para o lado esquerdo. Além disso, elementos da geração anterior são repetidos e combinados com a nova geração, variando assim o aspecto geral da percussão 2.

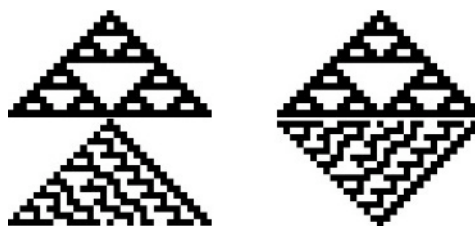


Figura 42. A figura à esquerda mostra os autômatos na forma original; a figura à direita mostra o segundo automato invertido, criando uma figura total que abre e se fecha

Depois de ter escrito a peça, seguindo as regras que a mim próprio me impus, adicionei alguns elementos ornamentais, como tercinas e semicolcheias. Rítmica e dinamicamente, a percussão 1 tem figuras simétricas em cada geração, funcionando também a este nível o compasso 1/8 como espelho. Por vezes, esta simetria é quebrada por causa dos ornamentos. O aspecto melódico da percussão 1, com melodias ascendentes e descendentes, segue igualmente (embora num plano menor) o contorno do autômato.

9.2.3 Análise da segunda parte

Em grande contraste com a primeira parte, cheia de actividade, a segunda caracteriza-se por eventos sonoros que parecem ser aleatórios. No entanto, a partitura reflecte aqui rigorosamente o autómato. Os dois percussionistas reproduzem (ou traduzem) juntos o autómato, em contraste com a primeira parte, onde só a percussão 1 o reproduzia na sua totalidade.

Um elemento comum às duas partes é o fim de cada geração, em que a percussão 2 segue o contorno do autómato. Na segunda parte, contudo, executa uma figura de duas colcheias, enquanto, na primeira, havia apenas colcheias isoladas.

9.2.4 Tratamento das alturas

As alturas foram escolhidas para dar ênfase aos intervalos de sétima maior e menor. Na primeira parte, altero acordes com melodias. Na segunda parte, mantém-se a ênfase nas sétimas, mas não há uma alteração sistematizada entre acordes e melodias. Na percussão 2 (da segunda parte), que segue o contorno do autómato, as duas últimas notas são sempre iguais para dar um carácter conclusivo a cada geração.

9.3 Conclusão

A escolha de utilizar, nesta peça, um autómato uni-dimensional resultou, de facto, numa base de informação mais fácil de gerir. Também a transformação em ritmos, isto é, a atribuição dum evento sonoro a uma célula, resultou numa tradução mais fiel do autómato. Aqui não há células com conteúdo igual como n' *O Jogo da Vida*, onde a mesma nota era atribuída a várias células.

Em geral, pode afirmar-se que o primeiro grande passo necessário dar para se chegar a um bom resultado é *limitar* a informação. Esta é a maior lição que aprendi ao escrever a peça.

Capítulo 10 *KRACHT*, para Grande Orquestra

A minha obra *KRACHT* será o último estudo de caso deste projecto de investigação. É também o mais extenso, a todos os níveis — instrumentação, duração e utilização dos autómatos celulares. Foi escrita para grande orquestra, com muitos instrumentos em papel solístico (*divisi*). Das três peças estudadas, trata-se daquela que tem maior duração (cerca de 20 minutos). Finalmente, e talvez o mais importante, os autómatos celulares foram aplicados a vários parâmetros do som; *e.g.*, altura, ritmo e dinâmica.

10.1 Fonte de inspiração

A minha obra é baseada numa peça electrónica do compositor americano Dave Seidel, *Palimpsest*,⁹⁰ que utiliza as primeiras 100 gerações da regra 57. Aí, o autómato controla o conteúdo espectral de dois acordes, que alternam regularmente. Porque o autómato tem sempre outros conjuntos de células activas, o conteúdo espectral dos acordes difere sempre também. A forma gráfica do autómato é bastante característica, salta à vista; será esta, porventura, a razão por que a peça tem para mim uma sonoridade atraente. A minha composição difere bastante da de Dave Seidel, logo porque uma peça instrumental tem características diferentes duma electrónica. Como já foi dito na introdução, e como corolário deste projecto académico sobre autómatos celulares, o meu objectivo artístico era escrever peças instrumentais: três foram entretanto concluídas. Pude aí desenvolver a minha própria linguagem, no contacto que, durante a minha investigação, tive com diversos estilos.

10.2 Análise da obra

Nesta secção, vou explicar os processos utilizados na peça. A composição é construída em várias camadas sobrepostas. Todos os processos que utilizam autómatos celulares utilizam a regra 57.

⁹⁰ Dave Seidel, “Palimpsest,” 2005, [Mysterybear productions - Music by Dave Seidel](http://mysterybear.net/article/23/palimpsest), 2009 15 de Maio <<http://mysterybear.net/article/23/palimpsest>>.

Foram utilizadas apenas as primeiras 100 gerações desta regra, que mostram um comportamento interessante. Depois disso, as gerações apresentam comportamento periódico.

10.2.1 Primeira camada: camada de fundo

A composição tem, conforme referido, a regra 57 como base. As primeiras 100 gerações são utilizadas para controlar o conteúdo espectral. Por motivos práticos, rodei o gráfico 90 graus (Fig. 43).

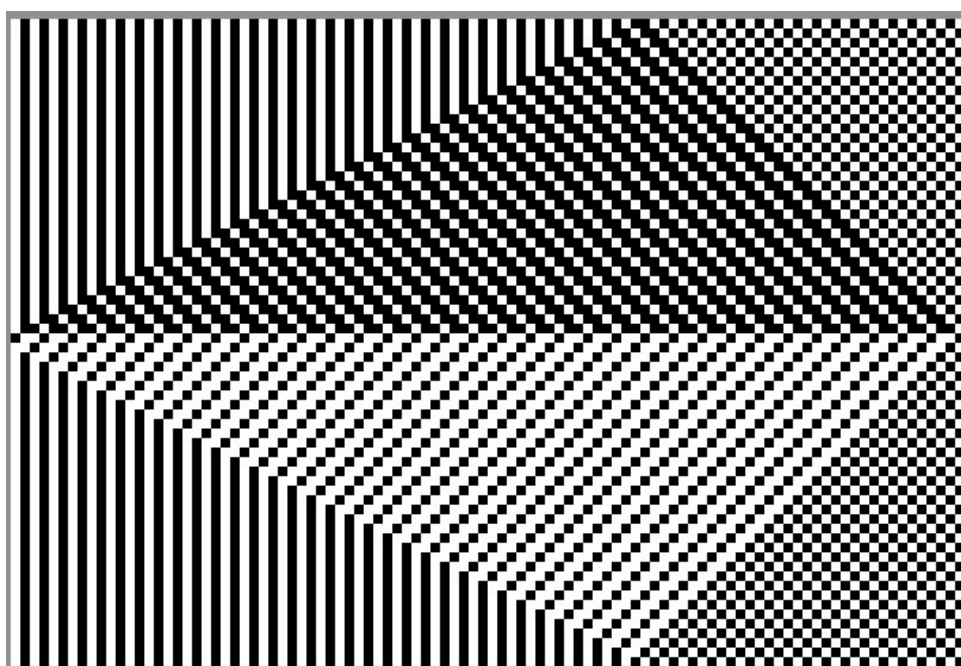


Figura 43. Regra 57, rodada 90 graus por motivos práticos

Dividi o autómato em duas partes, ficando a célula central como eixo comum. A parte superior controla o conteúdo espectral (aqui, os primeiros 34 parciais) da nota *Dó0* (nas gerações ímpares) ou *Dó#0* (nas gerações pares). A parte inferior controla o conteúdo espectral (os primeiros 35 parciais) da nota *Ré#0*. Pelo facto de cada geração ter uma configuração diferente de células activas, cada acorde tem também um conteúdo espectral diferente. No início da peça, a diferença entre as gerações ímpares e pares é muito grande: na primeira geração, apenas 1 célula está viva; na segunda geração, estão 65. Gradualmente, mais células vão tornando-se vivas nas gerações ímpares, e menos nas gerações pares. É na 100ª geração que surge o comportamento

periódico, que, pelo seu carácter repetitivo, menos me interessa. Daí, ter utilizado apenas as 100 gerações iniciais.

Os acordes têm uma duração de 9 semínimas, divididos que estão em três de compassos de $\frac{3}{4}$, e são arpejados durante toda a peça. Este arpejo é concebido graficamente. No início, tem um inclinação de 90 graus, isto é, as notas entram todas no mesmo tempo e o acorde é sustentado durante 9 semínimas. Gradualmente, essa inclinação vai ficando menor e acaba com uma inclinação de 45 graus. Explica-se melhor este processo por meio dum gráfico (Fig. 44):

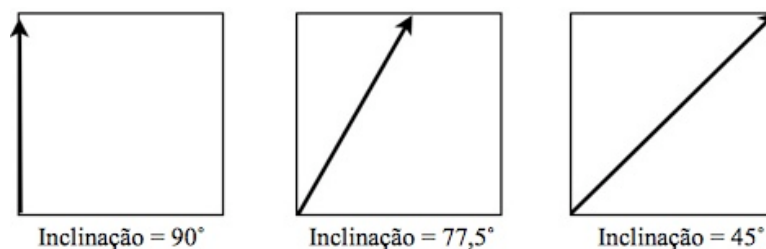


Figura 44. A inclinação do arpejo vai ficando menor ao longo da peça

Musicalmente, resulta num arpejo cada vez mais alargado no tempo: o último arpejo tem um duração de 9 semicolcheias.

As entradas das notas foram calculadas da seguinte maneira: a nota mais aguda ($M/5$) tem uma frequência de 1.357,15 Hertz. Como, na última geração, esta nota tem que entrar no tempo $t = 9$, podemos calcular o momento da entrada através da seguinte fórmula:

$$\max f/\max t = 1.357,15/9 = 150,79$$

por isso, a equação para a linha é $f = 150,79 \times t$

$$\text{sendo } t = 150,79 / f$$

Dividi a peça em 25 partes, quer dizer, o arpejo muda a sua inclinação 25 vezes durante toda a peça, a cada quatro novas gerações. Calculei, assim, o momento da entrada da nota mais aguda e, através deste valor, calculei todas as outras entradas. Para facilitar as entradas dos músicos, arredondei os valores: a figura rítmica menor é uma décima (quíaltera) da semicolcheia.

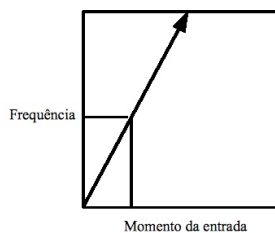


Figura 45. As entradas são calculadas através da relação com o arpejo

No início da peça, os dois acordes estão separados um do outro para salientar a grande diferença do respectivo conteúdo espectral. No c. 130, as notas comuns começam a estar ligadas para se obter um som sustentado, evitando atacar sempre a nota mais grave dos acordes arpejados. Estas ligaduras foram adicionadas só depois ter escrito os acordes. Por vezes, quando muda a sua orquestração, uma nota comum é retomada por outro instrumento, sendo *modulada* timbricamente. No entanto, o instrumento inicial só muda de nota depois desta ser modulada (ou transformada) pelo novo timbre. A utilização das ligaduras introduz na peça um elemento que quebra o rigor do arpejo. Este processo de *transformação tímbrica*⁹¹ continua até ao c. 199. Aqui se mostra um exemplo simplificado:

Figura 46. C é nota comum: na primeira figura, esta nota não está ligada, de que resulta um buraco; na segunda, C fica sustentado no violino enquanto entra o trompete. Por conseguinte, há uma fase transitória, uma modulação tímbrica, que torna a música mais interessante.

⁹¹ O conceito paradigmático de modulação como transformação (ou reinterpretação do sentido) de qualquer parâmetro musical é tirado do livro de Miguel Ribeiro-Pereira, A Theory of Harmonic Modulation: The Plastic Model of Tonal Syntax and the Major-Minor Key System (Porto: Politema, 2005).

Na secção seguinte (cc. 199-207), as notas entram todas em simultâneo: o acorde é sustentado e, através de acentuações, percebe-se o arpejo no interior dessa massa sonora. No c. 241, as notas comuns são acentuadas no tempo em que deveriam entrar, seguindo a lógica do arpejo. Do c. 253 até ao penúltimo acorde, todas as notas estão ligadas, mesmo que não sejam comuns, de que resultam acordes “poluídos”, isto é, em que notas estranhas invadem o acorde. Finalmente, o último acorde é arpejado normalmente; todavia, é sustentado durante mais dois compassos, como se fosse uma suspensão escrita, para atrasar a entrada da nota final, tocada pela harpa, no derradeiro compasso.

10.2.2 Segunda camada: processos rítmicos

O ritmo básico é controlado pelo arpejo, tal como está escrito. Daí resulta um ritmo que vai sendo progressivamente mais lento. Para introduzir elementos de variação, foram utilizados processos rítmicos, principalmente na percussão e na harpa; no fim da peça, sobretudo nas cordas. Todos estes processos de variação rítmica são baseados em autômatos celulares, utilizando a regra 57, cujo método de aplicação já foi descrito em 6.1.2 (“Ritmo”). O primeiro lugar onde implementei este processo foi na percussão (cc. 28-63): foi utilizado um autômato de 27 células, em que há 39 gerações antes de surgir um comportamento periódico. As células foram aplicadas em 3 compassos por cada geração, o que resultou em figuras de tercinas.

Sobrepõe-se a este autômato um outro, agora com tamanho de 15 células, também na percussão. Aqui as células foram aplicadas num só compasso, de que resultaram figuras de quintinas. Este processo acaba no c. 57. Os três percussionistas tocam os mesmos instrumentos em três lugares diferentes, alternando entre eles as figuras rítmicas, o que cria um movimento espacial. A linha melódica é sempre descendente; quando esta atinge a nota mais grave, um salto súbito em movimento contrário permite-lhe recomeçar.

Um terceiro autômato, de 24 células, será apresentado no vibrafone (c. 92). Só as 33 gerações iniciais são utilizadas; o autômato é lido ao contrário, em movimento retrógrado, começando pela última geração. As alturas utilizadas fazem parte do acorde e abrangem todo o registo do vibrafone. Aqui, também, o movimento é sempre descendente e, depois de atingir a nota mais grave, logo recomeça como anteriormente. Neste caso, todavia, a descida ultrapassa a fronteira dos acordes, quebrando, assim, o arpejo da primeira camada. Na figura 47, mostra-se este processo sob a forma gráfica.

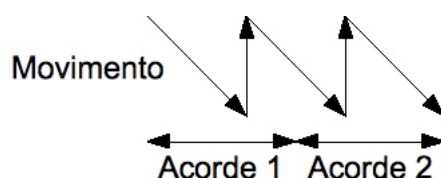


Figura 47. A linha melódica do vibrafone ultrapassa a fronteira dos acordes

Para se introduzir sons percussivos, o vibrafone (cc.102, 104, 105, 111-114, 116, 118-120, 123, 124 e 128) foi substituído por instrumentos de percussão sem altura definida.

O quarto autômato, de 18 células aplicadas em 3 compassos, terá início na harpa (c. 116). A sua aplicação originou figuras rítmicas de sextinas. Originalmente, traduzi-o para uma combinação de harpa (afinada um quarto-de-tom acima), algumas cordas e vibrafone. Porque o resultado musical foi insatisfatório, utilizei apenas a parte da harpa. Por motivos de orquestração, para reforçar o som, esta é acompanhada por algumas cordas. Tal como acontece na tradução dos autômatos anteriores, o movimento da linha melódica é sempre descendente, recomeçando este padrão quando se atinge a nota mais grave.

O quinto autômato, de 15 células e lido também em movimento retrógrado, terá início na percussão 2 (c. 205). A aplicação deste, constituído exclusivamente pelos sinos, originou figuras de quintinas. Ao contrário dos processos anteriores, a linha melódica é agora descendente e

ascendente, em alternância constante, parecendo uma onda. Foi utilizado todo o registo dos sinos, que tocam as notas do acorde.

O sexto autômato, tocado pelo vibrafone (c. 218), retoma o de 27 células já utilizado anteriormente no c. 28, mas lido agora em movimento retrógrado. Também aqui a linha melódica se assemelha a uma onda. Eis a sua representação (Fig. 48):

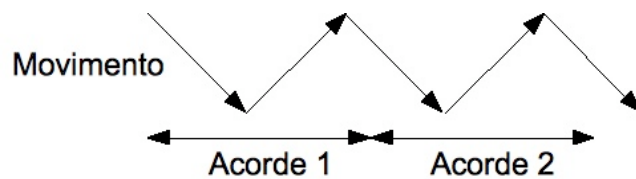


Figura 48. A linha melódica que parece uma onda; aqui também ultrapassa a fronteira dos acordes

O sétimo autômato, de 24 células aplicadas num compasso, aparecerá nos contrabaixos (c. 235). É lido no sentido normal, começando pela primeira geração, e a linha melódica é, uma vez mais, sempre descendente. No c. 248, os violoncelos acompanham os contrabaixos.

O oitavo autômato entrará nas violas (c. 253), em septinas e lido inversamente, em movimento retrógrado.

Finalmente, o nono autômato começará nos contrabaixos e violoncelos (c. 271), com uma nova sequência de sextinas. No c. 274, os primeiros violinos acompanham as violas, e os segundos violinos acompanham violoncelos e contrabaixos.

10.2.3 Terceira camada: dinâmicas

As dinâmicas são controlados sistematicamente durante toda a peça. Podemos dividi-la também em 8 partes, segundo esta perspectiva dinâmica, embora não coincidentes com os processos rítmicos dos autômatos.

1. cc. 1-45: entre *p* e *mf* nas cordas, *pp* e *p* nos sopros.

2. cc. 46-87: entre *mf* e *f* nas cordas, *mp* e *mf* nos sopros.
3. cc. 88-129: entre *f* e *ff* nas cordas, *mf* e *f* nos sopros.
4. cc. 130-171: entre *ff* e *fff* nas cordas, *f* e *ff* nos sopros.
5. cc. 172-198: estática nas cordas (*fff*) e nos sopros (*ff*).
6. cc. 199-234: estática em toda a orquestra (*fff*).
7. cc. 235-255: entre *fff* e *ff* nas cordas, *ff* e *mf* nos sopros.
8. cc. 256-301: estática nas cordas (*ffff col legno battuto* para obter um som poderoso), entre *mf* e *p* nos sopros.

A representação gráfica do autômato apresenta uma estrutura tripartida (tríade ou trindade), articulando as duas primeiras partes (A) e a última (b). No início da peça, as cordas tocam 2 compassos em *crescendo* e 1 em *decrescendo*, enquanto os sopros fazem o mesmo padrão invertido, 2 em *decrescendo* e 1 em *crescendo*. No c. 88 (geração 34), os sopros começam a tocar 2 compassos em *crescendo* e 1 em *decrescendo*, nos harmônicos ímpares, ou 2 em *decrescendo* e 1 em *crescendo*, nos harmônicos pares. Este processo contrapontístico de dinâmicas é invertido em cada geração. A partir do c. 91, será utilizado também nas cordas: começa nas oitavas mais graves e vai, gradualmente, estendendo-se ao registo agudo. Há quatro tipos de dinâmica, que se mostra a seguir (Fig. 49). Alternei-as em séries de quatro, começando com a nota do acorde mais grave. Sempre em evolução, o acorde é, pois, dinâmico.

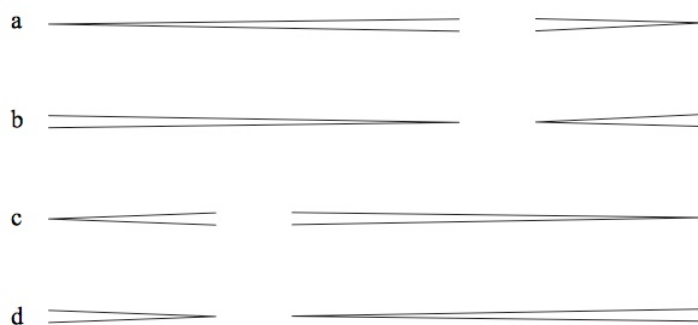


Figura 49. Os quatro tipos de dinâmicas possíveis

Desde o c. 239, estes quatro tipos são diminuídos (ou contraídos) num compasso apenas. Assim, o ritmo das dinâmicas é acelerado e aumenta a actividade musical.

10.2.4 Quarta camada: orquestração

Na representação gráfica do autómato, vemos que este começa com blocos de células “monolíticos” (foi este o termo sugerido por Magnus Lindberg, quando leu a peça) e vai, gradualmente, fragmentando-se. Esta fragmentação é transposta para a orquestra: a peça começa com as cordas, apenas, de modo a obter um timbre homogéneo; gradualmente, entram as madeiras, uma a uma, começando pelo instrumento mais grave. Este processo começa no c. 10 e, em cada duas gerações (de seis em seis compassos), entra um novo instrumento com uma nota igual à das cordas, mas cujo ataque é diferido dum compasso e meio. A entrada das madeiras segue as notas do arpejo. Quando já todas entraram, os metais seguem o mesmo processo. No meio da peça, já toda a orquestra é utilizada.

A orquestra está disposta duma maneira específica (Fig. 50), de modo a obter um efeito especial, embora reduzido. Porque o arpejo é ascendente, o som nas cordas vai do lado direito ao lado esquerdo. As madeiras estão dispostas ao contrário, com os instrumentos graves do lado esquerdo e os agudos do lado direito. Consequentemente, o som desloca-se no sentido inverso. Finalmente, os metais estão dispostos da mesma forma que as cordas. De tudo isto resultam três camadas tímbricas (orquestrais) de som.

Na primeira fase da peça, escrevi primeiro as cordas e depois adicionei os sopros; estes acompanhavam as cordas. A meio da obra, fiz o inverso: primeiro, escrevi os sopros e, depois, as cordas. À medida que a peça avança, as cordas vão tendo um papel menos importante em relação ao arpejo. No c. 235, os contrabaixos tocam *col legno battuto*, com uma sonoridade quase percutida. As outras cordas vão progressivamente imitando os contrabaixos, e, no final, só os sopros, a percussão e a harpa tocam as notas do acorde. Como entidades independentes, a

10.3 Conclusão

De acordo com os algoritmos, os processos extra-musicais, *KRACHT* para orquestra é a peça mais rigorosa que escrevi até hoje. Nela consegui criar uma estrutura sólida e obter um resultado que considero artisticamente bom. Apesar de ser criada através processos algorítmicos, julgo que a peça tem credibilidade e razão de ser. É muito importante para mim pensar e criar a estrutura antes de começar a escrever qualquer peça. Se as bases não forem sólidas, haverá inevitavelmente problemas durante a escrita.

Capítulo 11 Conclusão e Perspectivas Futuras

Na minha Tese, quis trabalhar sobre composições que utilizassem processos extra-musicais. Atraiu-me o mundo dos autômatos celulares: apesar de parecerem muito simples, têm um comportamento extremamente interessante e uma configuração visual distinta, atraente e invulgar. Neste trabalho, procurei reflectir a sua composição estrutural através da música. No sentido de compreender melhor os autômatos celulares, tive de pesquisar as suas características gerais, que apresentei na I parte da Tese. Depois, na II parte, procurei formas de transpor a estrutura dos autômatos para música. Várias formas foram apresentadas, com vantagens e desvantagens. Finalmente, na III parte, elaborei três estudos de caso, que consistem em peças que escrevi durante o trabalho de pesquisa. Creio que nelas se verifica uma evolução positiva da minha composição. Cada experiência conduziu-me a melhores resultados, tendo a peça final para orquestra coroado todo o processo. Gostaria, com esta Tese, de cativar outras pessoas para o mundo dos autômatos celulares e da música feita com eles. Espero também que mais compositores venham, no futuro, a interessar-se por estes processos.

Por isso, quero acabar este trabalho com algumas sugestões para investigação futura. Nesta tese, foram examinadas formas de criação de harmonia e ritmo. Uma etapa lógica seguinte será investigar a criação de melodias através de autômatos celulares. Podemos inspirar-nos na

investigação feita por Beyls⁹² e Miranda,⁹³ que escreveram aplicações para gerar melodias e harmonia. No entanto, o desenvolvimento destas aplicações foi interrompido. Uma possibilidade seria a de recriar estas aplicações para serem utilizadas em computadores actuais. Em geral, pode dizer-se que será necessário encontrar uma maneira de controlar as entradas das notas através do autómato celular. Uma opção será combinar os métodos mencionados no capítulo 6 para a aplicação de notas e ritmos. Exemplificamos: temos um autómato uni-dimensional que contém quatro células; cada célula equivale a uma semínima num compasso de 4/4. A cada célula está atribuída uma altura. Se aplicarmos as alturas e os ritmos, temos o seguinte resultado (Fig. 51).



Figura 51. A combinação da aplicação de notas e ritmos: cada nota surge sempre no mesmo tempo no compasso

A desvantagem aqui é que uma certa nota surge sempre no mesmo momento do compasso, por exemplo, o *Si* surge sempre no quarto tempo do compasso. Para variar a posição da nota no compasso, podemos variar o ponto de início em que começamos a ler uma geração do autómato. Mostremos com o exemplo de cima e alteramos o ponto de início. Na primeira geração, o ponto de início é a nota *Dó*, que vem no primeiro tempo do compasso. Na segunda geração, o ponto de início é a nota *Mi* (que vem no primeiro tempo do compasso) e a nota *Dó* será lida no fim (e, por conseguinte, vem no fim do compasso). No exemplo, a célula a que foi atribuída a nota *Dó* está morta na segunda geração; por isso, temos uma pausa.



Figura 52. Mudando o ponto de início, muda a posição da nota no compasso

Outra sugestão que quero fazer, e que é uma consequência da solução mencionada acima, é a ideia de multi-tarefa. Nas minhas peças, utilizei um autómato para controlar um parâmetro só.

⁹² Peter Beyls, “Cellular Automata Mapping Procedures,” *Proceedings of the International Computer Music Conference* (Miami: ICMA, 2004) 55-58.

⁹³ Eduardo Reck Miranda, “Cellular Automata Music: From Sound Synthesis to Musical Forms,” Eduardo Reck Miranda e John A Biles, *Evolutionary Computer Music* (London: Springer, 2007) 170-193.

Seria interessante encontrar uma maneira de ligar vários parâmetros musicais a um autômato. Para fazer isso, há que investigar pormenorizadamente o comportamento dos autómatos celulares para detectar aspectos relevantes que possam ser aplicados a parâmetros musicais.

Finalmente, já que um autômato celular é controlado por uma função de transição local, poderíamos ligar as regras dessa função a regras musicais. Poderíamos, para usar um exemplo simplificado, dizer que se uma célula está viva com dois vizinhos vivos e é um *Sol* na geração actual, então será um *Lá* na geração seguinte. Claro que não estamos limitados a utilizar uma escala cromática nem uma afinação bem-temperada. É óbvio que, com esta abordagem, será necessária uma grande parte de experiência. Portanto, já que compor é experimentar, acredito que este caminho é um desafio interessante para um compositor.

• Referências

- Ashauer, Daniel. Algorithmic Composition. master Thesis. University of technology Vienna. Vienna: University of technology Vienna, 2008.
- Bell, David Ingalls. “HighLife — An Interesting Variant of Life (Part 1/3).” 2009 15 de Março. The home page of David Ingalls Bell. 2009 15 de Maio <<http://members.tip.net.au/~dbell/articles/>>.
- Beyls, Peter. “Cellular Automata Mapping Procedures.” Proceedings of the International Computer Music Conference. Miami: ICMA, 2004. 55-58.
- Burks, Arthur W. Essays on Cellular Automata. Illinois: University of Illinois Press, 1968.
- Burraston, Dave. “CASS – (Cellular Automata Simplistic Selector.” Noyzelab. 2009 15 de Maio <<http://www.noyzelab.com/gensys/CASS/cass.html>>.
- —. Generative Music and Cellular Automata. Doctoral Dissertation. Sidney: University of Technology, 2006.
- —. “One Dimensional Cellular Automata Musical Experiments with Max.” Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction. Las Vegas: HCI International, 2005.
- Codd, Edgar F. Cellular Automata. New York: Academic Press, 1968.
- Dahlstedt, Palle. “Evolution in Creative Sound Design.” Evolutionary Computer Music. Ed. E. R. Miranda e J. A. Biles. London: Springer, 2007. 79-99.
- Dias, Rui. “Little Life: Installation Submission.” NIME, 2006.
- Ebcioglu, Kemal. “An expert system for harmonizing chorales in the style of J. S. Bach.” The Journal of Logic Programming, 8.1-2 (n.d.): 145-185.
- Flammenkamp, Achim. “Garden of Eden/ Orphan.” 2008 7 de Novembro. Achim. 2009 15 de Maio <http://www.homes.uni-bielefeld.de/achim/orphan_2nd.html>.
- Gage, Dustin, Elizabeth Laub and Briana McGarry. CELLULAR AUTOMATA: IS RULE 30 RANDOM? Michigan: Central Michigan University, 2005.
- Gardner, Martin. “MATHEMATICAL GAMES The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life".” Scientific American 223 (1970): 120-123.
- Harley, James. Xenakis, His Life in Music. New York: Routledge, 2004.
- Hazard, Chris and Catherine Kimport. Fractal Music. Research Project. Madison: Tursiops Truncatus Studios, 1999.
- Hoffman, Peter. “Towards an Automated Art: Algorithmic Processes in Xenakis' Compositions.” Contemporary Music Review 21.2-3 (2002): 121-131.
- Illiad Suite for String Quartet. 2009. 2009 15 de Maio <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/282904/Illiad-Suite-for-String-Quartet>>.
- Järveläinen, Hanna. “Algorithmic Musical Composition.” Algorithmic Musical Composition. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2000.
- Kirke, Alexis and Eduardo Reck Miranda. “Capturing the Aesthetic: Radial Mappings for Cellular Automata Music.” Journal of the ITC Sangeet Research Academy (2007): 15-23.
- Koenig, H. “Colored Life.” 2006 Março. Game of Life News. 2009 15 de Maio <http://pentadecathlon.com/lifenews/life_variants>.
- Langton, Chris. “Self-reproduction in cellular automata.” Physica D 10 (1984): 134-144.

- Li, Wentian and Norman Packard. "The Structure of the Elementary Cellular Automata Rule Space." Complex Systems 4 (1990): 281-287.
- Maloch, Joseph. Cellular beats – Rhythms from Cellular Automata. 2005. 2009 15 de Maio <http://www.music.mcgill.ca/~mallochj/projects/cellular_beats>.
- Maurer, John A. "A brief history of Algorithmic Composition." 1999 Março. john a. maurer iv. 2009 15 de Maio <<http://ccrma.stanford.edu/~blackrse/algorithm.html>>.
- Mavroudi, Antonia. Simulating City Growth by using the Cellular Automata Algorithm. Master Dissertation. London: University of London, 2007.
- McKay, Cory. SpeciesChecker: A system for automatically proofreading species counterpoint. undergraduate thesis. University of Guelph. Guelph: University of Guelph, 2002.
- Millen, Dale. "An Interactive Cellular Automata Music Application in Cocoa." Proceedings of the 2004 International Computer Music Conference. Miami: International Computer Music Association, 2004.
- Miranda, Eduardo Reck. "Cellular Automata Music: From Sound Synthesis to Musical Forms." Miranda, Eduardo Reck and John A Biles. Evolutionary Computer Music. London: Springer, 2007. 170-193.
- Moore, Edward F. "Machine Models of Self-Reproduction." Proceedings of Symposia in Applied Mathematics. Ed. R.E. Bellman. New York: American Mathematical Society, 1962. 17-33.
- Owen, Mark St John. "The Wireworld Computer." 2009 22 de Março. quinapalus.com. 2009 15 de Maio <<http://www.quinapalus.com/wires0.html>>.
- Packard, Norman H and Stephen Wolfram. "Two-Dimensional Cellular Automata." Journal of Statistical Physics 38.5/6 (1985).
- Pegg, Ed Jr. "WireWorld." MathWorld--A Wolfram Web Resource. 2009 15 de Maio <<http://mathworld.wolfram.com/WireWorld.html>>.
- Popovici, Adriana and Dan Popovici. Cellular automata in image processing. Universidade de Timisoara de Oeste. Romania: Universidade de Timisoara de Oeste, n.d.
- Quinn, Marty and Loren David Meeker. "RESEARCH SET TO MUSIC: THE CLIMATE SYMPHONY AND OTHER SONIFICATIONS OF ICE CORE, RADAR, DNA, SEISMIC AND SOLAR WIND DATA." Proceedings of the 2001 International Conference on Auditory Display. Espoo: ICAD, 2001. 56-61.
- Reggia, James A, et al. "Simple systems that exhibit self-directed replication." Science 259.5099 (1993): 1282-1287.
- Rennard, Jean-Philippe. "Introduction to Cellular Automata." 2006 Maio. Rennard.org. 2009 15 de Maio <<http://www.rennard.org/alife/english/acintrogb01.html>>.
- Ribeiro-Pereira, Miguel. A Theory of Harmonic Modulation: The Plastic Model of Tonal Syntax and the Major-Minor Key System. Porto: Politema, 2005.
- Roads, Curtis. The Computer Music Tutorial. Cambridge: MIT Press, 1996.
- Schelling, Thomas C. "Dynamic models of segregation." Journal of Mathematical Society 1.2 (1971): 143- 146.
- Schiff, Joel L. Cellular Automata: A Discrete View of The World. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008. Schottstaedt, Bill. Automatic Species Counterpoint STAN-M-19. Stanford University. Stanford: Stanford University, 1984.
- Seidel, Dave. "Palimpsest." 2005. Mysterybear productions - Music by Dave Seidel. 2009 15 de Maio <<http://mysterybear.net/article/23/palimpsest>>.
- Serquera, Jaime and Eduardo Reck Miranda. "Cellular automata sound synthesis: from histograms to spectrograms." Automata 2008: Theory and

- Applications of Cellular Automata. Ed. R Alonso-Sanz, e A Lawniczak A. Adamatzky. Frome: Luniver Press, 2008. 368-377.
- Soddell, Jacques and Fran Soddell. jacques soddell. 2008 23 de Agosto. 2009, 15 de Maio <<http://cajid.com/jacques/lsys/software.htm>>.
 - Solomos, Makis. "Cellular Automata in Xenakis' Music Theory and Practice." Definitive Proceedings of the International Symposium Iannis Xenakis. Ed. S. Georgaki, Solomos M. and G. Zervos. Athena, 2005. 120-138.
 - Supper, Martin. "A few remarks on algorithmic composition." Computer Music Journal 5.1 (2001): 48-53.
 - Taube, Heinrich K. Notes from the Metalevel: an Introduction to Computer Composition. Abingdon: Routledge, 2004.
 - Truchan, Bret. Glitch Sequencer Cellular automaton based MIDI sequencer. 2009. 2009 15 de Maio <<http://www.glitch-sequencer.com/>>.
 - Tyler, Tim. "Neighbourhood Survey." CELLULAR AUTOMATA. 2009 15 de Maio <<http://cell-auto.com/neighbourhood/>>.
 - Varga, Balint Andras. Conversations with Iannis Xenakis. London: Faber and Faber, 1996.
 - Von Neumann, John. "The general and logical theory of automata." Taub, A. W. The Collected Works of John Von Neumann. Ed. A. H. Taub. Vol. 5. Oxford: Pergamon Press, 1961. 6 vols. 288-328.
 - Ward, Douglas P, Alan T Murray and Stuart R Phinn. "Integrating spatial optimization and cellular automata for evaluating urban change." Annals of Regional Science 37.1 (2003): 131-148.
 - Weisstein, Eric W. "Ampichiral." MathWorld--A Wolfram Web Resource. 2009 15 de Maio <<http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>>.
 - —. "Elementary Cellular Automaton." Mathworld-A Wolfram Web Resource. 2009 15 de maio <<http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>>.
 - —. "Garden of Eden." ERIC WEISSTEIN'S TREASURE TROVE THE LIFE CELLULAR AUTOMATON. 2009 15 de Maio <[HTTP://ERICWEISTEIN.COM/ENCYCLOPEDIAS/LIFE/GARDENOFEDEN.HTML](http://ERICWEISTEIN.COM/ENCYCLOPEDIAS/LIFE/GARDENOFEDEN.HTML)>.
 - —. "R-Pentomino." ERIC WEISSTEIN'S TREASURE TROVE OF THE LIFE CELLULAR AUTOMATON. 2009 15 de Maio <<http://www.ericweisstein.com/encyclopedias/life/R-Pentomino.html>>.
 - —. "R-Pentomino." ERIC WEISSTEIN'S TREASURE TROVE OF THE LIFE CELLULAR AUTOMATON. 2009 15 de Maio <<http://www.ericweisstein.com/encyclopedias/life/R-Pentomino.html>>.
 - —. "Rule 90." 2009 15 de Maio. MathWorld--A Wolfram Web Resource. 2009 15 de Maio <<http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>>.
 - —. Turing Machine. 2009 15 de Maio. 2009 15 de Maio <<http://mathworld.wolfram.com/TuringMachine.html>>.
 - Wilensky, Uri. "NetLogo Brians Brain Model." 2002. Netlogo. 2009 15 de Maio <<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/BriansBrain>>.
 - Wolfram Research. Wolfram Tones an experiment in a new kind of music. 2005. 2009 15 de Maio <<http://tones.wolfram.com/>>.
 - Wolfram, Stephen. A New Kind of Science. Champaign: Wolfram Media, 2002.
 - —. "Random Sequence Generation by Cellular Automata." Advances in Applied Mathematics 7.2 (1986): 123-169.
 - —. "Universality and complexity in cellular automata." Physica D 10.1 (1984): 1-35.

- Xenakis, Iannis. Formalized Music. Ed. S. Kanach. Trans. G. H. Hopkins, J. Challifour C. Butchers. 2^a. Stuyvesant: Pendragon Press, 1992.