

Simulando o modelo ORCH-OR através de autômatos celulares quânticos

Mirkos Ortiz Martins ¹
Juliana Kaizer Vizzotto ²
Giovani Rubert Librelotto ²

Resumo: Este artigo tem a proposta de demonstrar uma implementação computacional conforme o modelo de autômato celular para simular o comportamento de estruturas biológicas (microtúbulos) da teoria quântica de Stuart Hameroff e Roger Penrose chamada ORCH OR. Segundo essa teoria, os microtúbulos, que se encontram no interior dos neurônios, atuam como hardware quântico biológico, e o resultado de seu processamento é um dos caminhos para a compreensão da formação da consciência humana. Autômatos celulares, segundo Gregory [1], são apropriados para modelar sistemas orgânicos, onde o problema físico ou biológico é dividido em células que se comportam como máquinas finitas.

Palavras-chave: Autômatos Celulares. Computação Quântica. Nanotecnologia.

Abstract: *This article is the proposal to establish a computational implementation as the model of cellular automata to simulate the behavior of biological structures (microtubules) of the quantum theory of Stuart Hameroff and Roger Penrose call ORCH OR. According to this theory the microtubules, which are within the neurons, act as biological quantum hardware and the result of its processing is one of the paths to understanding the formation of human consciousness. Cellular automata second Gregory [1] is appropriate for modeling organic systems, where the physical or biological problem is divided into cells that behave like machines finite.*

Keywords: *Cellular automata. Quantum Computing. Nanotechnology.*

1 Introdução

Este trabalho, da área de simulação, apresenta uma abordagem alternativa para modelar e simular sistemas quânticos utilizando como base o modelo quântico ORCH OR [2]. A modelagem de um sistema quântico nos moldes do ORCH OR é particularmente interessante por ser um sistema atuando em condições ambientais e em escala nanométrica, algo menos complexo (teoricamente) de ser manipulado que sistemas subatômicos implementados em spintrônica³ em elétrons, feixe de fótons⁴ ou outro sistema de menor escala métrica para a construção de hardware quântico.

O trabalho descreve o cenário de implementação para um autômato celular quântico, que é uma evolução do autômato celular de Rasmussen [3], codificado com orientação a objeto na fase de validação do modelo e em linguagem funcional (como parte de defesa de dissertação de mestrado em nanociências). A implementação do autômato celular quântico é motivada pela possibilidade de utilização do software construído como um simulador de estados conscientes no modelo ORCH OR.

A maneira como este trabalho está organizado é a seguinte: em primeiro lugar, descreve sucintamente o modelo ORCH OR, onde são identificadas características particulares que habilitam este modelo para a implementação em autômato celular; a seguir, descreve o autômato celular, que é um modelo de computação, e exemplifica com a visualização de sua implementação mais famosa: o “Jogo da Vida”. [4]

¹Curso de Ciência da Computação, UNIFRA, Rua dos Andradas, 1412 - Santa Maria (RS) - Brasil
{mirkos@unifra.br}

²Departamento de Eletrônica e Computação – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Avenida Roraima, nº 1000 – 97105-900 – Santa Maria (RS) - Brasil
{juvizzotto@inf.ufsm.br, librelotto@inf.ufsm.br}

doi: 10.5335/rbca.2011.008

³Apesar de existirem propostas de dispositivos para spintrônica baseados em moléculas de ácido desoxirribonucleico (ADN) [5].

⁴Aqui a complexidade da implementação reside, além do fato de o detector de fóton necessitar de uma leitura altamente precisa para fazer a medição de um fóton apenas, o emissor também precisa ser pequeno da ordem de angstroms (quantum dot) [6].

O próximo item apresentado é o autômato celular de Rasmussen [3], que faz a simulação das estruturas biológicas estudadas no modelo ORCH OR, porém sem a abordagem quântica para os estados das células do autômato. A seção posterior trata da modelagem quântica de um autômato celular simulando as estruturas biológicas propostas por Hameroff e Penrose no seu modelo ORCH OR. Por fim, é descrita a implementação desta abordagem e fazem-se comentários sobre seus resultados.

2 Computação quântica biológica de Hameroff e Penrose

A história do modelo quântico biológico começa com a publicação por um físico inglês chamado Roger Penrose, em 1989, do seu famoso livro *The Emperor New Mind*. Nesse livro, Penrose apresenta uma ideia de conexão entre o cérebro e a mente. A mente seria um fenômeno criado por um evento mecânico-quântico misterioso no interior dos neurônios. No livro não é fornecida uma localização exata de onde ocorria o fenômeno de formação da mente, porém a ideia em si é razoavelmente bem descrita [7].

Suas pesquisas anteriores sobre o funcionamento sobre a mente, e se haveria como programar um computador de forma a este adquirir consciência o levaram a concluir que “qualidade da compreensão e sentimento possuídos pelos seres humanos não é algo que possa ser simulado computacionalmente, ou seja, não pode ser quebrada numa série de passos, como um tipo de receita, que quando executada por um computador, iria resultar numa imitação aceitável da coisa real” [7].

Penrose então adentrou na consciência na mecânica quântica, colocando liberdade no processo da sua formação, esta ligada aos fatores probabilísticos da quântica. O processo físico não computável no cérebro responsável pela formação da consciência estaria ligado à característica de escolha aleatória da quântica.

Em *The Emperor New Mind* não é explicado minuciosamente como o cérebro escolhe uma solução “correta”. Não que ele saiba, porém, entre as atividades inconscientes que estão sendo processadas em segundo plano, ocasionalmente um pensamento, inspiração ou sentimento é trazido à tona da generalidade do ruído de fundo e é conduzido para a nossa consciência. O motivo de este estado específico ser a opção entre os demais é algo que, possivelmente, tem relacionamento com algum tipo de concordância existente entre padrões na mente [7].

Em contrapartida, Stuart Hameroff, estudante na Escola Médica Hahnemann, desde o início da década de 1970 interessou-se pelo estudo dos microtúbulos no processo de sinalização da divisão celular. Quando começou seu internato no Centro Médico de Tucson, passou a estudar anestesiologia motivado por um colega que lhe contou sobre uma propriedade de anestésias inaladas “desligarem” a consciência momentaneamente sem prejudicar o cérebro, aparentemente deformando os microtúbulos dos neurônios.

Em 1982 um engenheiro elétrico, sabendo do interesse de Hameroff por microtúbulos, mostrou-lhe uma microfotografia, perguntando-lhe o que era. Hameroff respondeu, instintivamente, que eram microtúbulos, obtendo a negativa do engenheiro: eram chaves microeletrônicas de um chip. Após fazer uma assimilação, Hameroff uniu as ideias de sinalização celular dos microtúbulos, formação de consciência e transporte de sinais intracelulares nos neurônios. Nos dez anos seguintes, ele foi melhorando suas teorias e estudando mais detalhadamente o funcionamento dos microtúbulos.

Em 1992, Roger Hameroff leu o livro de Penrose e viu a possibilidade de unir seus conhecimentos biológicos sobre os microtúbulos com a formalização quântica ainda incompleta do *The Emperor New Mind*. Marcou uma reunião com Penrose, e desse encontro surgiu o modelo ORCH OR.

No modelo ORCH OR, a formação da mente (consciência) é feita no interior das células do cérebro, os neurônios, mais precisamente nos microtúbulos. Os microtúbulos são estruturas intracelulares com sua parede formada por proteínas polares chamadas tubulinas, que possuem livre conformação. De acordo com a orientação das tubulinas, o microtúbulo funciona como um canal orientado para cargas elétricas (os sinais sinápticos). A polarização de cada tubulina é definida pelo conjunto de forças eletrostáticas das tubulinas vizinhas (seis). Sob determinadas condições e em determinados intervalos, a polarização das tubulinas é indeterminada, e Hameroff e Penrose definiram esta indeterminação como uma sobreposição de estados (Figura 1). Se uma vizinhança de várias tubulinas entrar em sobreposição num intervalo de tempo de até 500 ms [2], esta vizinhança está em um estado emaranhado que sofre colapso quando aplicada sobre ela uma gravidade quântica. E todo o conjunto da rede de microtúbulos atua como um sistema interligado, sendo as ocorrências de sobreposições e emaranhamentos

“orquestradas” pelas interligações proteicas destes microtúbulos.

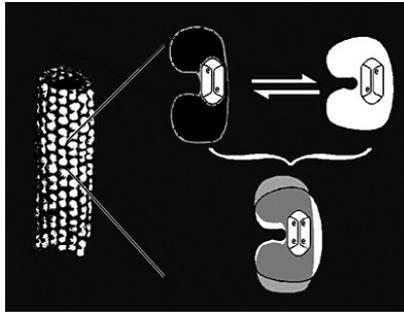


Figura 1. Microtúbulo e conformação de tubulinas

3 Autômatos celulares modelando sistemas biológicos

Muitos sistemas físicos ou biológicos podem ser modelados como uma coleção de corpos que repetidamente interagem e evoluem com o tempo. Alguns sistemas, especialmente os mais simples, podem ser modelados usando o que chamamos de autômatos celulares [1]. O princípio da modelagem consiste em dividir o problema físico ou biológico em uma coleção de estruturas semelhantes, tanto em funcionamento como iteração, as células que são máquinas de estados finitos. Após serem inicializadas, as células passam por transições de estados, baseados no estado corrente da célula, bem como no estado de seus vizinhos, e com regras bem definidas de transição.

Um exemplo de autômato celular é chamado de Jogo da Vida [4], fundamentado na década de 1960 por John Horton Conway, que consiste em uma matriz bidimensional de células. Cada célula contém um organismo (está vivo) ou não contém (está morto).

Para este problema, cada célula possui oito vizinhos, localizados acima, abaixo, à esquerda, à direita e nas quatro diagonais. Células nas quinas possuem três vizinhos; aquelas nas bordas possuem cinco. O jogo da vida é executado da seguinte forma: primeiro, a borda é iniciada; segundo, cada célula examina o seu estado e os estados dos seus vizinhos e, então, faz sua transição de estado, conforme as regras a seguir:

- uma célula viva com zero ou uma célula vizinha viva morre de solidão.
- uma célula viva com duas ou três células vizinhas vivas sobrevive para outra geração.
- uma célula viva com quatro ou mais vizinhas vivas morre de superpopulação.
- uma célula morta com exatamente três vizinhas vivas torna-se viva.

O processo é repetido por algum número de gerações (passos) visto na Figura 2 [4].



Figura 2. Jogo da Vida

4 O autômato celular de Rasmussen

Em novembro de 1992 (portanto, anterior ao modelo ORCH OR) foi publicado um trabalho conjunto entre cinco cientistas, entre eles Steen Rasmussen e Hameroff [3]. Rasmussen, um pesquisador do Laboratório Nacional

de Los Alamos (EUA) com interesse em experimentos da origem da vida, modelagem de aprendizado e comportamento adaptativo em microtúbulos do citoesqueleto celular, neste trabalho é responsável pela implementação de um autômato celular. Neste artigo, o texto inicia com a seguinte motivação: “A computação moderna está evoluindo em direção a estruturas menores, mais rápidas e arquiteturas paralelas e adaptativas. Computação com alterações de conformação de proteína pode oferecer pequenas estruturas (nanômetros), rápidos estados (nano segundos), automontagem, transições de fase e reestruturação e adaptativa. As desvantagens de computadores baseados em proteínas incluem a dificuldade de concepção de uma interface, a dependência sensível a um meio ambiente 'biológico', a suscetibilidade à degradação, senescência, e infecção. "No entanto, a computação baseada em proteínas oferece a melhor abordagem para a equivalência com a cognição humana.”

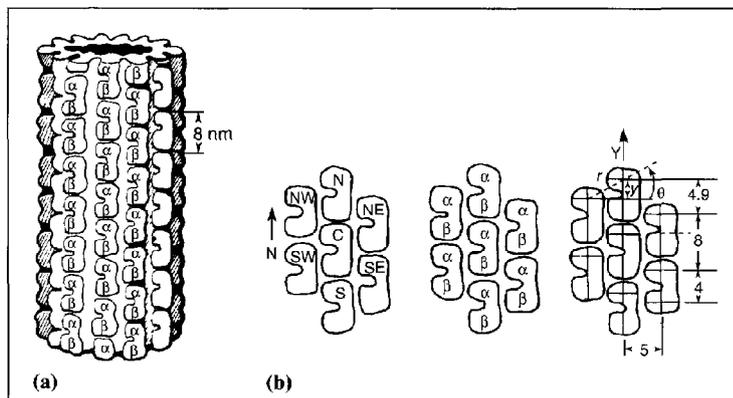


Figura 3. Dímero e sua vizinhança conforme Rasmussen

Então, no trabalho, Rasmussen define cada tubulina como uma célula num modelo de autômato celular e faz medidas de força de atração⁵ (Tabela 4) entre as tubulinas vizinhas (Figura 3) necessárias para a mudança de conformação do dímero central. O dímero central, neste caso, é cada célula.

Neighbor Position	Central Dimer α		Central Dimer β	
	Neighbor α	Neighbor β	Neighbor α	Neighbor β
North	+15.625	+62.500	+ 6.944	+15.625
Northeast	+15.205	-7.022	+ 9.635	+15.205
Southeast	-14.250	-8.338	- 7.022	-14.250
South	-15.625	-6.944	-62.500	-15.625
Southwest	-15.205	-9.635	+ 7.022	-15.205
Northwest	+14.250	+7.022	+ 8.338	+14.250

Figura 4. Forças para transição de conformação da tubulina

De acordo com a força exercida pela vizinhança, uma tubulina pode sofrer mudança conformacional do estado 0 para o estado 1, ou vice-versa. Essa mudança faz com que o microtúbulo habilite ou desabilite o sinal sináptico de percorrer um caminho dentro do citoplasma. A fisiologia do microtúbulo, com seu núcleo aquoso e com o isolamento externo do microtúbulo através de um estado gel do citoplasma vizinho das tubulinas fornece o ambiente perfeito para o sistema funcionar sem interferência.

5 O autômato celular quântico

Como Rasmussen escreveu seu autômato quatro anos antes da formalização do modelo ORCH OR, seu autômato celular não representa o comportamento quântico descrito por Hameroff e Penrose. O autômato de Rasmussen não apresenta células com estados sobrepostos, por exemplo, não descreve o momento de colapso dos

⁵Models for Molecular Computation: Conformational Automata in the Cytoskeleton - IEEE Computer, Nov 92, Hameroff R., Dayhoff J., Lahoz R., Samsonovich A. and Rasmussen S.

estados sobrepostos e emaranhados. No artigo de Hameroff e Penrose [2] é descrito um autômato celular com células em estados quânticos a partir dos dados recolhidos por Rasmussen.

Este trabalho é uma evolução do modelo básico de autômato celular clássico apresentado por Rasmussen e, por meio deste, tenta-se buscar padrões, dificuldades e questionamento quando implementado o modelo quântico. A implementação do autômato celular em linguagem Java serve para validar o conceito e, como trabalho avançado, também é implementado (como parte de defesa de dissertação de mestrado) em linguagem funcional Haskell [8]. Basicamente, a implementação em Java utiliza duas classes para simular o modelo ORCH OR, *MatrizCelular* e *Celula*.

5.1 Regras de transição

As regras de transição para o autômato celular quântico também seguem o princípio de atração de vizinhança que Rasmussen formaliza em seu trabalho. Porém, para que o autômato celular consiga modelar o comportamento quântico proposto por Hameroff, precisa de algumas alterações:

- a célula precisa armazenar estados quânticos e como eles serão representados, e é preciso definir a força eletrostática para o estado clássico evoluir para um estado sobreposto (estado quântico);
- existe a necessidade de formalizar a maneira que uma célula com estado quântico sofre colapso e evolui para um estado clássico. Necessita-se de uma descrição do critério de parada para a simulação quando todas as tubulinas entrarem em sobreposição e como interpretar as transições clássico-quântico equântico-clássico.

5.2 Célula

O autômato celular quântico precisa que sua unidade básica, a célula, além dos valores clássicos (o que ocorre no modelo de Rasmussen), também faça o tratamento de dados quânticos. Nessa implementação, a sobreposição que representa o valor quântico no modelo ORCH OR é aquela onde α e β não podem ser iguais a zero ao mesmo tempo.

5.3 Matriz Celular

A matriz que representa a parede de tubulinas em um microtúbulo é a mesma matriz base do autômato celular, mostrada na Figura 5. Conforme pode ser visualizado, cada tubulina mantém sua vizinhança de seis outras tubulinas, mas a implementação desta matriz obedece a um mapeamento em Java. Cada um dos seis vizinhos da célula são calculados de acordo com a linha e coluna da mesma; assim, é possível em uma matriz bidimensional que um elemento possua seis vizinhos (deslocando-se as linhas pares em $\frac{1}{2}$ elemento à esquerda).

A classe Java *MatrizCelular* implementa os atributos *geracaoAtual* (uma matriz de a_{nm} elementos [$m = 18$ obedecendo à descrição do microtúbulo neural], onde cada elemento a_{nm} é um objeto *Celula*) e *geracaoTemp* (uma matriz onde os estados celulares calculados vão sendo guardados conforme são calculadas as F_{net}^6).

6 Regras de transição

As células (tubulinas) da matriz celular sofrem alteração nos seus estados de acordo com a força eletrostática exercida pela sua vizinhança. Alterações clássicas seguem as regras descritas por Rasmussen, sendo que para um estado evoluir de -10 para 1 é necessário que o arranjo de vizinhos exerça uma força $F_{net} + 9 \times 2,3 \times 10^{14}$ Newton e, conseqüentemente, evoluir de 1 para 0 a força F_{net} de $-9 \times 2,3 \times 10^{14}$ Newton.

A transição do estado 0 para sobreposição (2) foi escolhida arbitrariamente como -1 a metade do valor necessário da F_{net} para mudança clássica, ou seja, $4,5 \times 2,3 \times 10^{14}$ Newton, e a transição do estado 1 para sobreposição (2) foi definida como $-4,5 \times 2,3 \times 10^{14}$ Newton. Para completar todas as situações possíveis, resta definir como ocorre o colapso do estado sobreposto para um estado clássico. De acordo com o modelo ORCH OR, o colapso ocorre com a atração gravitacional quântica, e também pode ocorrer de acordo com um tempo

⁶ F_{net} é a força eletrostática exercida pelos polos da proteína polar Tubulina, calculada por Rasmussen.

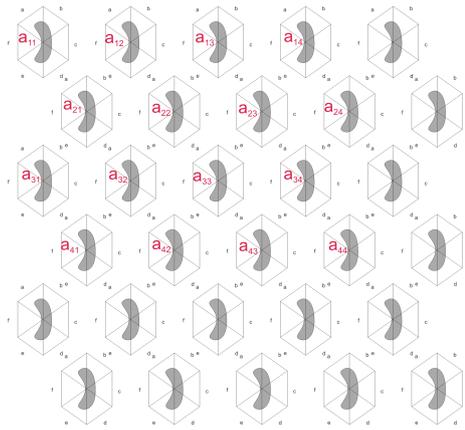


Figura 5. Matriz de Células

Tabela 1. Tabela de Transições das Células

Transição	Força	Porta quântica equivalente
$0 \rightarrow 1$	$9 \times 2, 3 \times 10^{-14}$ Newton	Not
$0 \rightarrow$ sobreposição	$4, 5 \times 2, 3 \times 10^{-14}$ Newton	Hadamard
$1 \rightarrow 0$	$-9 \times 2, 3 \times 10^{-14}$ Newton	Not
$1 \rightarrow$ sobreposição	$-4, 5 \times 2, 3 \times 10^{-14}$ Newton	Hadamard
sobreposição $\rightarrow 0$	Gravidade quântica	Observação/Leitura
sobreposição $\rightarrow 1$	Gravidade quântica	Observação/Leitura

máximo de coerência quântica (500 ms) [2]. Para a implementação foi necessário definir a geração de um número randômico para simular a ocorrência aleatória da gravidade quântica. A Tabela 1 representa o conjunto de forças para a transição do estado do dímero no autômato celular quântico.

7 Simulação

A simulação consiste em iniciar a matriz de células com estados em 0 (esta matriz representa a parede do microtúbulo). A seguir é feita a inserção do impulso sináptico nas células a_{1j} , $0 \leq j \leq 18$ (a primeira linha da matriz, a partir do alto). Este impulso é representado por uma lista de 18 valores (exemplo: `int is[18] = 0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1`). Com o passar dos ciclos são visualizadas diferentes gerações de células, de acordo com o arranjo das vizinhanças e seus respectivos estados.

Cada vez que é pressionado o botão “Evoluir” (Figura 6) é efetuado o cálculo das Fnet entre as vizinhanças de uma célula e seu estado é atualizado. É possível também definir a quantidade de ciclos que o simulador irá evoluir sem a necessidade de click no botão seguidas vezes. Em cada célula, de acordo com as cores demonstradas, pode ser visualizado o seu estado (azul para 0, verde para 1 e preto para sobreposição).

8 Resultados

Foram observadas células entrando em sobreposição em diferentes áreas da matriz do autômato, sem a preferência de um sítio em particular. Quando repetidas entradas por diversos ciclos, os resultados não obedeciam à mesma regra quando da ocorrência de uma sobreposição em alguma das gerações entre o início e o fim da simulação. Com a entrada do sinal sináptico de todos os 18 valores idênticos em 0, o microtúbulo não sofre excitação, validando que o motivo da mudança de conformação é a diferença de carga entre os polos dos dímeros tubulina.

A expectativa quanto ao funcionamento dos elementos do autômato celular ORCH OR, quando não con-

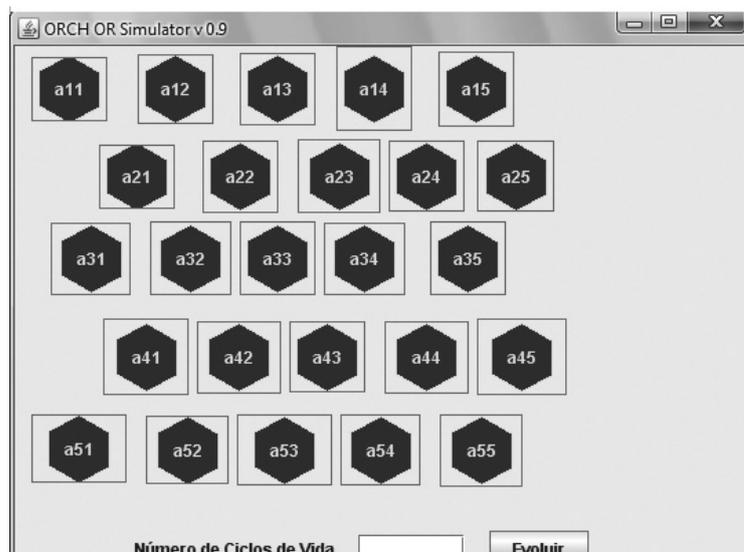


Figura 6. Tela do simulador

frontado o seu comportamento quântico, entra em concordância com os resultados obtidos por Rasmussen. Esse cenário já comprovado demonstra que a expansão do modelo clássico para o quântico não ocasionou alteração no funcionamento do autômato celular. Os três casos em que somente é feita a leitura clássica dos estados estão de acordo com o modelo de Rasmussen.

9 Conclusão

O grande número de entradas (262144, ou 218, pois temos 18 valores em 0 ou 1 como entrada do sinal sináptico) e a aleatoriedade do colapso de estados sobrepostos exigem um enorme número de cenários para se obter um conjunto de situações para a obtenção de conclusões como obteve Rasmussen. Porém, o modelo de autômato celular quântico demonstra um bom laboratório de estudo do comportamento de unidades quânticas atuando em simultâneo.

Neste trabalho também é possível encontrar áreas para maior estudo de projeto, como, por exemplo, a simulação do cenário para colapso de estado sobreposto, onde o fator randomicidade pode ser mais bem estudado e implementado. Também nas forças atuantes para a mudança de estado (conformação) somente são levados em consideração os seis vizinhos do dímero central, não se levando em conta a Fnet de uma eventual tubulina localizada em um microtúbulo vizinho e bem próximo. A contagem da vizinhança pode ser estendida espacialmente em mais uma dimensão.

O simulador pode ser melhorado, possibilitando a inicialização da matriz de células com diferentes tipos de configurações além daquela onde todas as células estão com seu estado igual a zero.

A simulação da iteração entre unidades quânticas isoladas pode ser de suma importância no momento em que o hardware quântico baseado em spins polares for implementado e sua utilização for de proximidade entre essas unidades equivalente ao modelo de tubulinas em ORCH OR.

Referências

- [1] ANDREWS, G. *Foundations of Multithreaded, Parallel, and Distributed Programming*. Addison-Wesley. 1999.
- [2] HAMEROFF, S.; PENROSE, R. Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: A model for consciousness? In: Press, M., editor, *Toward a Science of Consciousness - The First Tucson Discussions and Debates*, p. 507-540. MIT Press. 1996.

- [3] RASMUSSEN, S. et al. Models for molecular computation: Conformational automata in the cytoskeleton. In *IEEE Computer*. 1992.
- [4] BOSCH, R. Integer programming and conway's game of life. *SIAM Rev.*, 1(41):594, 1999. DOI:10.1137/S0036144598338252.
- [5] ZWOLAK, M.; VENTRA, M. D. Dna spintronics. *Appl. Phys. Lett.*, 1(81):925-927, 2002.
- [6] T., L.; A., K. Time-resolved two-photon quantum interference. *Appl. Phys. B.*, 1(1-03), 2003.
- [7] FREEMAN, D. Quantum consciousness. *Discover Magazine*, p. 89-98, 1994.
- [8] DUBOIS, A. *Programação funcional com a linguagem haskell*. Disponível em: <<http://www.macs.hw.ac.uk/~dubois/ProgramacaoHaskell.pdf>>. 2008.