

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FRANCISCANO**  
**ÁREA DE CIÊNCIAS NATURAIS E TECNOLÓGICAS**  
**MESTRADO EM NANOCIÊNCIAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

por

Mirkos Ortiz Martins

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TEORIA**  
**QUÂNTICA ORCH OR**

Santa Maria

2009

Mirkos Ortiz Martins

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TEORIA  
QUÂNTICA ORCH OR**

Trabalho apresentado ao Mestrado em Nanociências, área de concentração em Modelagem e Simulação, do Centro Universitário Franciscano - UNIFRA, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Nanociências..

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Dra. Juliana Kaizer Vizzotto(Orientador)

---

Dr. Carlos Mello

---

Dr. André Dubois

Santa Maria

2009

## Dedicatória

*Ao meu pai, que sempre foi, é e sempre será meu super-herói, mesmo não estando mais aqui comigo...*

## Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço minha orientadora, prof. Dra. Juliana Kaizer Vizzotto, pela apresentação ao assunto que me deixou deslumbrado e interessado em aprender cada vez mais: a computação quântica.

Agradeço também ao meu co-orientador, prof. Dr. Giovani Rubert Librelotto, por sua atenção, críticas sempre construtivas e uma visão focada em resultados, me fez pensar com outra perspectiva a produção acadêmica.

Agradeço à prof. Dra. Solange Fagan pela sua maneira simples de lidar com outras pessoas, mesmo quando elas ainda não são seus alunos apesar da sua visibilidade como pesquisadora e sua vida atribulada em prol da nanociência.

Obrigado prof. Dra. Ivana Zanella pelo modelo moral e profissional que me faz espelhar um objetivo maior no modo de lidar com o mundo competitivo da academia. Ao prof. Dr. Gilberto Orengo pelo auxílio na formatação deste trabalho e à prof. Dra. Ana Isabela Sales pela amizade, assim como aos outros professores do curso.

Meu sincero obrigado aos meus colegas que com sua convivência me fizeram crescer como pessoa e de algum modo uniram conhecimento para me tornar mais relevante na sociedade. Em particular ao meu colega Henrique Tamiosso pelo apoio e confiança em compartilhar conhecimento, profissão e amizade.

Obrigado mãe, Laurení (dona Deca), irmãos Guacira (minha primeira professora), Naomy (minha guarda-costas espiritual) e Vagner (companheiro de boas e más horas), pela família que moldou meu caráter durante todos estes anos e continua sempre ensinando algum detalhe para viver neste mundo tão dinâmico.

Obrigado Elaine Sirydakís, assim como toda a família Sirydakís, mas especialmente a Elaine pelo apoio quando foi possível, nos momentos em que os obstáculos pareciam maiores do que eles realmente eram. Aprendi muito com você.

Agradeço à todas as pessoas que foram gentis e amistosas durante este tempo, que com sua palavra de confiança me fizeram seguir em frente. Obrigado à UNIFRA pela infraestrutura e apoio à ciência, que me fez ter a oportunidade de crescer como ser humano. Obrigado à CAPES pelo financiamento no final do curso.

Enfim, obrigado Deus.

## Resumo

A realização de computadores quânticos vem sendo investigada do ponto de vista teórico e experimental por diferentes abordagens tais como: spins eletrônicos; trapped íons; ressonância magnética nuclear, etc. Uma abordagem alternativa vem sendo discutida no campo da computação quântica biológica: a nanomáquina quântica de Penrose e Hameroff conhecida como modelo Orch OR (*Orchestrated Objective Reduction*).

A nanomáquina quântica é baseada no comportamento dos microtúbulos cerebrais. Microtúbulos são estruturas biológicas existentes no interior das células e são formadas por dímeros de proteínas polarizadas, chamadas tubulinas, com formato globular, que se comportam como *qubits*. O comportamento dos microtúbulos deu origem a um aspecto interessante do modelo Orch Or chamado *Redução Objetiva*. Essencialmente, a *Redução Objetiva* é a idéia que sistemas quânticos mesmo isolados do ambiente externo irão reduzir (ou colapsar) devido a suas características geométricas intrínsecas. A compreensão do comportamento dos microtúbulos pode nos proporcionar uma visão mais apurada de como é manipulada a informação enviada ao cérebro por impulsos elétricos pelos órgãos sensoriais e como é criada fisicamente a consciência. Neste trabalho, apresenta-se uma modelagem e simulação computacional para a nanomáquina quântica biológica de Penrose e Hameroff. Mais especificamente, discute-se um modelo computacional para a nanomáquina utilizando-se autômatos celulares. A simulação deste modelo é implementada graficamente na linguagem de programação funcional Haskell. Haskell é uma linguagem funcional (de alto nível) pura e já vem sendo estudada em diversos trabalhos como uma linguagem interessante para modelagem e simulação de estruturas quânticas.

Através da utilização do simulador computacional pode-se verificar propriedades interessantes do comportamento das tubulinas, tais como mudanças conformacionais em série (ondas planares e estacionárias) e mudanças conformacionais quânticas (indeterminação de estado).

A modelagem para um entendimento do ponto de vista computacional do microtúbulo dará base para trabalhos futuros que poderão suportar algoritmos para o simulador de microtúbulos em Haskell. O presente trabalho pretende dar subsídios para simular atividades neurais mais complexas futuramente.

## Abstract

The realization of quantum computers has been investigated from the point of view of theoretical and experimental different approaches such as electronic spins; trapped ions, nuclear magnetic resonance, etc. A alternative approach is being discussed in the field of biological quantum computing: a quantum nanomachine of Penrose and Hameroff model known as Orch OR (Orchestrated Objective Reduction).

The nanomachine is based on the quantum behavior of brain microtubules. Microtubules are structures biological existing inside the nerve cells that form dimers of polarized proteins, called tubulin, with globular shape, which behave as qubits. The behavior of microtubules led to an interesting aspect of the model Orch Or call objective reduction. Essentially, the objective reduction is the idea that quantum systems that isolates the external environment will reduce (or collapsing) because of their intrinsic geometrical characteristics. Understanding the behavior of microtubules may provide us a more accurate view of how it handled the information sent to the brain by electrical impulses through sensory system and how physical consciousness is created. In this work, presents a modeling and simulation for computational quantum of biological nanomachines Penrose and Hameroff. More specifically, it discusses a computational model for the nanomachine by use of the cellular automata. The simulation of this model is implemented graphically in the functional programming language Haskell. Haskell is a functional language (high level) and pure already has been studied in several papers as an interesting language for modeling and simulation of quantum structures. Through the use of computer simulation can be verified interesting properties the behavior of tubulin, such as conformational changes in series (planar and stationary waves) and conformational change of quantum states (unknown of state value).

The model for understanding the point of view of a simple computational microtubular give a basis for future work, based on this model and is intended to develop algorithms for a simulated microtubules in Haskell. This dissertation aims to give subsidies to simulate neural activities more complex future.

*Is this the real life? Is this just fantasy?  
Caught in a landslide...No escape from reality.  
Open your eyes. Look up to the skies and see.  
I´m just a poor boy, I need no sympathy.  
Because I´m easy come,easy go...  
A little high,little low.  
Anyway the wind blows,doesnt really matter  
to me.  
To me...  
(Bohemian Rhapsody - Queen)*

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivos .....	3
1.2 Objetivos Específicos .....	3
1.3 Trabalhos relacionados .....	3
1.4 Estrutura do texto .....	4
<b>2. Computação Quântica</b> .....	<b>6</b>
2.1 Computação .....	6
2.2 Base da Computação Quântica: a Mecânica Quântica .....	8
2.2.1 Notação de Dirac .....	9
2.2.2 Espaço de Hilbert .....	10
2.3 Axiomas da Mecânica Quântica .....	11
2.3.1 Estados .....	11
2.3.2 Observáveis .....	11
2.3.3 Medições .....	12
2.3.4 Dinâmica .....	13
2.3.5 Composição de Estados .....	13
2.4 Aplicações da Computação Quântica .....	13
2.4.1 Algoritmo de Grover .....	15
2.4.2 Algoritmo de Deutsch .....	18
2.5 Sumário .....	20
<b>3. Orchestrated Objective Reduction - Orch OR</b> .....	<b>21</b>
3.1 A teoria Orch OR .....	21
3.2 Tubulinas .....	24
3.3 Microtúbulos Celulares .....	26
3.4 Microtúbulos Neurais .....	26



3.5	Processamento de informação nos microtúbulos. ....	28
3.6	Sobreposição de Tubulinas e emaranhamento ....	30
3.7	Colapso das Tubulinas em sobreposição e emaranhamento ....	31
3.8	Sumário ....	31
<b>4.</b>	<b>Autômato Celular de Rasmussen.....</b>	<b>32</b>
4.1	Definição do autômato celular de Rasmussen ....	33
4.1.1	Conformação das Tubulinas.....	34
4.1.2	A força FNet .....	34
4.1.3	Regras de Transição da Tubulinas .....	36
4.2	Sumário .....	37
<b>5.</b>	<b>Modelagem Funcional de Orch OR .....</b>	<b>38</b>
5.1	A linguagem Haskell .....	38
5.2	Autômato Celular em Haskell .....	38
5.3	Tubulinas do modelo Orch OR como células em um autômato celular .....	40
5.4	Vizinhança da Tubulina .....	42
5.5	Regras de Transição de estados no autômato celular Orch OR .....	45
5.6	Colapso de Onda .....	46
5.7	Funções identificadas para Orch OR .....	48
5.8	Sumário .....	48
<b>6.</b>	<b>Estudo de Caso .....</b>	<b>49</b>
6.1	Descrição dos Casos.....	49
6.1.1	Entrada padrão de sinal sináptico .....	49
6.1.2	Verificação de saída de carga na ausência de sinal sináptico .....	49
6.1.3	Observar a ocorrência de planares na matriz de tubulinas .....	49
6.1.4	Observar a ocorrência de ondas estacionárias .....	50
6.2	Modelagem e Simulação dos Casos .....	50
6.2.1	Sinal Sináptico como entrada do autômato celular .....	51
6.2.2	Autômato Celular sem sinal sináptico como entrada.....	51
6.2.3	Planares na matriz de tubulinas .....	52
6.3	Resultados obtidos.....	55
6.4	Sumário .....	56

<b>7. Conclusão.....</b>	<b>57</b>
7.1 Discussões Finais .....	58
7.2 Trabalhos Futuros .....	58
7.2.1 Determinação dos coeficientes $\alpha$ e $\beta$ em tubulinas sobrepostas.....	59
7.2.2 Consideração das Fnet em espaço tridimensional .....	59
7.2.3 Tratamento de estado dentro da estrutura da célula .....	59
7.2.4 Estudo dos formatos de planares propagando-se no microtúbulo .....	59
7.2.5 Implementação em QHaskell .....	60
7.2.6 Modelagem matemática das funções e evolução temporal do sistema Orch OR	60
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Lei de Moore 2006 Fonte: <a href="http://pt.wikipedia.org/wiki/LeideMoore">http : //pt.wikipedia.org/wiki/LeideMoore</a>	7
Figura 2.2 – Circuito quântico para o algoritmo de Deutsch .....	18
Figura 3.1 – Microtúbulos no citoplasma neural. Fonte: <a href="http://www.quantumconsciousness.org">http :</a> <a href="http://www.quantumconsciousness.org">//www.quantumconsciousness.org</a> .....	22
Figura 3.2 – Microfotografia do dímero da proteína Tubulina. Adaptado de <a href="http://www.aecom.yu.edu/aif/instructions/irm/index.htm">http :</a> <a href="http://www.aecom.yu.edu/aif/instructions/irm/index.htm">//www.aecom.yu.edu/aif/instructions/irm/index.htm</a> .....	25
Figura 3.3 – Orientação da tubulina.....	25
Figura 3.4 – Microtubulo .....	26
Figura 3.5 – Entrada de Sinal em um neurônio .....	28
Figura 3.6 – A formação da consciência segundo Hameroff.....	29
Figura 3.7 – Eixo de orientação de uma tubulina .....	30
Figura 4.1 – Jogo da Vida .....	33
Figura 5.1 – Padrão de representação para a conformação das células no simulador	41
Figura 5.2 – Representação da Tubulina por Rasmussen.....	43
Figura 5.3 – Matriz de Tubulinas .....	44
Figura 6.1 – Interface do Simulador .....	50
Figura 6.2 – Sinal Sináptico propagando-se no autômato .....	51
Figura 6.3 – Evolução do autômato sem sinal de entrada .....	52
Figura 6.4 – Planar vertical .....	53
Figura 6.5 – Planar L.....	53
Figura 6.6 – Planar imutável .....	54
Figura 6.7 – Planar encontrando célula polarizada .....	54

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1 – Força eletromagnética das tubulinas vizinhas.....	35
Tabela 4.2 – Tabela das forças de transição clássica.....	36
Tabela 5.1 – Método de cálculo da vizinhanca da Tubulina .....	45
Tabela 5.2 – Tabela das forças de transição clássica e transição quântica.....	46
Tabela 5.3 – Listagem de funções do autômato Orch OR .....	48

## 1. Introdução

A física do séc. XX foi uma das ciências mais beneficiadas pelo processo de aperfeiçoamento industrial. Se antes os laboratórios eram lugares precários onde alquimistas desenvolviam suas fórmulas, com a acurácia da indústria em manufaturar instrumentos de precisão foi possível unir o mundo das idéias dos cientistas com a fabricação de aparelhos cada vez mais capazes. Com novas e mais precisas ferramentas, os estudiosos puderam comprovar suas teorias e ter em mãos meios de observar novas características da natureza, que os forneciam um fértil campo para mais idéias. Dentre as teorias que começaram a serem comprovadas, afirmadas e alteradas está o estudo do átomo (DREXLER, 1986). Com aparelhos e técnicas desenvolvidos na era industrial, cientistas como Ernest Rutherford, Niels Bohr e Arnold Sommerfeld entre outros, puderam contestar que a matéria é feita de unidades indivisíveis chamadas átomos. Assim, iniciaram-se estudos sobre a estrutura do corpo atômico. Neste contexto, as novas pesquisas e teorias iniciaram uma nova era na física, a física moderna onde um dos fundamentos é a mecânica quântica (HAMEROFF, 1996).

A mecânica quântica formaliza as propriedades de sistemas físicos da escala atômica. Propriedades estas essencialmente diferentes dos modelos tradicionais da física clássica (FEYNMAN, 1996). Os modelos estudados apresentavam características eletrônicas, óticas, conformais entre outras, diferentes do que o nosso senso comum está acostumado a observar e entender. A matéria (na escala atômica) se comporta como ondas, a luz pode ser descrita como matéria, corpos podem se comunicar instantaneamente mesmo que separados por um grande espaço vazio, dois estados de um corpúsculo podem ocorrer ao mesmo tempo, entre outros cenários (JÚNIOR, 2005).

Novas teorias começaram a surgir, antigos conceitos foram sendo mais bem entendidos e a tecnologia aos poucos foi sendo beneficiada por estas novas descobertas. Uma área que se beneficia com estes avanços da física quântica é a computação.

A computação quântica é uma área da computação que é na sua quase totalidade teórica devido a dificuldade de se construir computadores quânticos. Os modelos propostos atualmente para o computador quântico se baseiam em spin de elétron e núcleo atômico, feixe de fótons com propriedades quânticas e aprisionamento de íons, entre outros (STAMP, 2008). A materialização destes modelos é um tanto custosa visto que para manter as propriedades quânticas são necessários cuidados com o ambiente onde se está fazendo

esta computação, tais como baixas temperaturas (próximas do  $0K$ , ou zero absoluto), condições ótimas de pressão e umidade. É preciso um controle ambiental e também o isolamento sistema-observador, pois o observador causa interferência no sistema quântico. Uma abordagem alternativa vem sendo discutida no campo da computação quântica biológica: a *nanomáquina quântica* de Penrose e Hameroff conhecido como modelo Orch OR (*Orchestrated Objective Reduction*)(HAMEROFF, 1996). Este modelo é particularmente interessante pelo fato de descrever estruturas biológicas (proteínas) com comportamento quântico. Mais especificamente, na teoria Orch OR, os autores apresentam uma hipótese quântica para formação da consciência humana. A idéia proposta é de que os estados de formação (polaridade) das proteínas constituintes do citoesqueleto dos neurônios, as tubulinas, e as transições de estado dessas proteínas, têm propriedades quânticas. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma abordagem discreta para modelar e simular esses sistemas quânticos biológicos utilizando uma teoria da computação biológica molecular: o autômato celular (TOFFOLI, 1987).

A teoria dos autômatos celulares descreve um modelo discreto bastante utilizado na área de simulação computacional. Os autômatos celulares modelam de forma simples, estruturas (células), organizadas em uma grade, com comportamento semelhante ordenado por regras dependentes de suas vizinhanças (HAMEROFF, 1996).

Além disso, nesta dissertação implementa-se um simulador gráfico para o autômato celular do modelo Orch OR, utilizando-se a linguagem de programação funcional Haskell (THOMPSON, 1999). Linguagens de programação funcional puras, como Haskell, fornecem uma visão de alto nível do programa, proporcionando aos seus usuários uma variedade de características que ajudam a construir programas elegantes e robustos. O conceito central em linguagens funcionais é a idéia de *função*, a qual computa um resultado dependendo dos valores de entrada. Especificamente, no caso deste trabalho de modelagem, a utilização da linguagem Haskell possibilita uma implementação de alto-nível, próxima à especificação matemática do modelo.

O campo da modelagem e simulação é tão diverso como o conhecimento do homem e para cada novo campo de estudo existe um modelo e como se manusear estes modelos. Em muitos casos não existe a possibilidade de se trabalhar diretamente com um artefato, um corpo ou com alguma entidade diretamente (que é o caso particular em sistemas quânticos, impedidos da sua observação direta) então é necessário a modelagem do sistema: descrever

sua estrutura e seu comportamento (ZEIGLER, 2000).

Trabalhar com modelos quânticos na escala molecular é atraente, pois a manipulação de um sistema em escala nanométrica é algo bem menos complexo, ao menos em teoria, do que manipular corpúsculos de sistemas subatômicos. O modelo de computação quântica em sistema biológico também possui o atrativo de trabalhar em condições ambientais o que pode ser entendido como um foco interessante para a construção de hardware quântico.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é apresentar uma modelagem inicial e uma simulação computacional para a nanomáquina quântica biológica de Penrose e Hameroff. Mais especificamente, discute-se um modelo computacional para a nanomáquina utilizando-se autômatos celulares. A simulação deste modelo é implementada graficamente na linguagem de programação funcional Haskell.

## 1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são apresentados a seguir:

- Modelar a nanomáquina utilizando autômatos celulares.
- Implementar graficamente o modelo computacional para as nanomáquinas quânticas de Hameroff e Penrose utilizando a linguagem funcional Haskell.
- Simular graficamente cenários interessantes, tais como sinal sináptico atuando como entrada no autômato, autômato sem sinal de entrada e planares (formas) na matriz de tubulinas, para o modelo definido neste trabalho.

## 1.3 Trabalhos relacionados

Antecipando a informação sobre a abordagem computacional que será dada neste trabalho para a teoria Orch OR, todo o comportamento da teoria de Hameroff e Penrose pode ser modelado utilizando-se de autômatos celulares. Autômatos celulares são interessantes para modelar sistemas biológicos, sendo uma implementação conceito o *Jogo da Vida* (CALLAHAN, 2005). É utilizado como base o trabalho de Rasmussen

(STEEN, 1992) que descreve o comportamento clássico das tubulinas como autômatos celulares. No trabalho de Rasmussen é estudada a iteração entre as tubulinas, regidas pela força eletromagnética exercida pelas polaridades de toda a vizinhança do dímero. Para modelar o comportamento das tubulinas, Rasmussen descreveu todo o modelo como um autômato celular, onde as células (tubulinas) poderiam estar carregadas com carga positiva ou negativa de acordo com sua orientação na parede do microtúbulo neural.

A base para esta dissertação é ampliar o modelo estudado por Rasmussen incluindo no comportamento das tubulinas orientações diferentes daquelas onde são definidas as cargas positivas e negativas, i.e., superposições. Desta forma, incorpora-se ao modelo o comportamento não-determinista (em relação a orientação da tubulina) necessário para descrever as propriedades da teoria Orch OR.

#### 1.4 Estrutura do texto

Este trabalho está estruturado como segue.

No Capítulo 2 é apresentada a base na qual está fundamentada a computação quântica: a mecânica quântica. Assim, descreve-se a notação utilizada neste trabalho, bem como os axiomas básicos necessários para o entendimento da computação quântica. Então a unidade básica de informação para a computação quântica, o qubit, é introduzido. Como ilustração, são discutidos dois algoritmos que fazem uso da performance da computação quântica para resolver problemas, são eles: o algoritmo de Grover, para busca em base de dados não ordenada; e o algoritmo de Deutsch, para fatorar números.

No Capítulo 3 é detalhada a teoria *Orchestrated Objective Reduction*, *Orch OR*, descrevendo suas componentes e como espera-se explicar a formação da consciência humana pelo comportamento quântico destas componentes. Foca-se estes comportamentos em duas seções: sobreposição e emaranhamento; e colapso do estado sobreposto e emaranhado.

Na sequência, o Capítulo 4 descreve o conceito computacional de *autômato celular* demonstrando a implementação de Steen Rasmussen para o microtúbulo neural, porém, com comportamento clássico somente. Então é apresentada a modelagem das componentes computacionais quânticas que descrevem os elementos biológicos de Orch



OR assim como as regras seguidas pelo autômato.

A modelagem funcional da teoria Orch OR é feita no Capítulo 5, implementando um autômato celular quântico na linguagem de programação Haskell. São descritas as funções implementadas assim como as componentes e regras do autômato resultante.

No Capítulo 6, é apresentado o estudo de caso para a simulação do autômato implementado. São feitas descrições de quatro cenários de simulação assim como descritos os resultados obtidos.

Conclui-se o trabalho fazendo-se discussões finais e propostas de trabalhos futuros no Capítulo 7.

## 2. Computação Quântica

Para o entendimento da computação quântica é necessário compreender a relação entre conceitos computacionais com a física quântica. Este capítulo começa com uma motivação para a computação quântica, descrevendo a evolução do microprocessador até a necessidade de mudança de paradigma para o tratamento deste componente. A seguir são discutidas as principais características e axiomas da mecânica quântica, os quais são necessários para o entendimento da computação baseada nesta teoria. Então, descreve-se brevemente o processo de computação (i.e. processamento da informação) considerando a utilização da teoria quântica. São apresentados os *qubits*, unidade básica de processamento na computação quântica. Como exemplos, são indicadas três classes de algoritmos quânticos motivadores para a área de computação quântica. A primeira classe é representada pelo algoritmo de Deutsch, o qual simplesmente exemplifica o paralelismo quântico. Na segunda classe são referidos algoritmos para a área de criptografia quântica. Finalmente, o algoritmo de Grover para pesquisa em base de dados não ordenadas, ilustra a última classe descrita neste texto.

### 2.1 Computação

A arquitetura de computação evolui de acordo com uma teoria que associa o poder de processamento com o número de transistores que um processador possui: a Lei de Moore (INTEL, 2007). De acordo com esta lei, a cada 18 meses o poder de processamento dobra (conseqüentemente, o número de transistores também aumenta) como observado na Figura 2.1. Para alimentar a necessidade de poder de processamento das aplicações os construtores de microprocessadores precisam aumentar o número de transistores em uma única pastilha de silício.

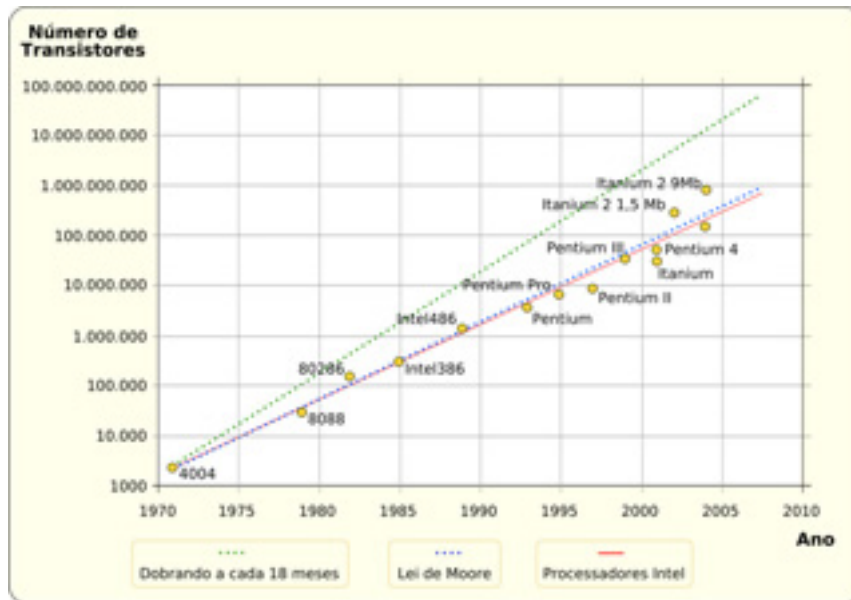


Figura 2.1 – Lei de Moore 2006 Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Lei\\_de\\_Moore](http://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Moore)

O primeiro processador comercial da Intel, o 4004, possuía cerca de 3000 transistores em uma pastilha de silício, isto em 1971. Ao atingir o estágio de VLSI (*Very Large Scale Integration* - Integração de muito larga escala) nos anos de 1980 os transistores dos processadores passaram a medir algumas dezenas de nanômetros e o número de transistores por pastilha chegou à casa dos milhões por centímetro quadrado (WARNER, 2004). A tecnologia atual da Intel (geralmente com desenvolvimento equivalente da sua concorrente AMD) está na fabricação de pastilhas com 2 bilhões de transistores de proximidade de 45 nm (processadores Nehalem)(INTEL, 2008).

No momento em que os transistores tornam-se tão diminutos, os mesmos começam a sofrer a ação de propriedades nas quais os engenheiros de hardware não haviam enfrentado nas escalas de integração anteriores: problemas de capacitância, onde as portas dos transistores começam a se comportar como memória, não mudando de sinal como deveriam. Também ocorre o fenômeno de transporte de corrente entre as portas lógicas que estão em proximidade (os contatos para os transistores agora estão vizinhos em escala nanométrica e o transporte de energia sofre tunelamento) além do superaquecimento dos

contatos destruindo o barramento dos chips. No caso da temperatura, a dissipação térmica de um Pentium 4 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) é próxima daquela dos núcleos de reatores nucleares (MERMIN, 2007). Se a integração de um maior número de processadores continuarem seguindo as regras de manufatura atuais, nos próximos microprocessadores a dissipação térmica seria da ordem daquela que ocorre na superfície solar. Quanto maior a dissipação térmica maior o consumo de energia, algo que não confere com o esperado pela indústria e consumidores (INTEL, 2007).

O aumento performance de processamento requerido na evolução computacional está sendo resolvido por algumas abordagens diferentes como o processamento paralelo (multicore), onde vários núcleos se unem na computação dos dados. Uma abordagem, significativamente diferente é a Computação Quântica (MERMIN, 2007). A computação quântica tem sua origem nos fundamentos de uma ciência contemporânea, subárea da Física, surgida no séc. XX: a Física Quântica. Neste capítulo são apresentados as principais características da computação quântica e seu formalismo.

## 2.2 Base da Computação Quântica: a Mecânica Quântica

A mecânica quântica (JÚNIOR, 2005) é uma ciência moderna (século XX), que explica o comportamento de corpos no nível atômico. Um átomo é uma estrutura extremamente pequena, medindo cerca de 2 décimos de um nanômetro. Sistemas quânticos se comportam de maneira bastante curiosa, um pouco diferente de como estamos acostumados a pensar. Algumas propriedades interessantes da mecânica quântica são:

- Superposição - a superposição é a propriedade de corpúsculos assumirem mais de um estado possível ao mesmo tempo. Como exemplo, um átomo pode estar girando para a direita ou para esquerda. A sobreposição de estado neste átomo seria o momento quando ele apontar para direita e esquerda simultaneamente (ou a incapacidade de determinar em qual direção ele está apontando).
- Emaranhamento (ou Correlação - *Entanglement*) - este fenômeno ocorre com dois ou mais corpos (objetos) interligados de forma que a medição do estado de um corpo fornece informação sobre o outro corpo, independentemente da sua distância. Esta característica permite a ocorrência de dois outros fenômenos práticos: o teleporte quântico e a codificação super-densa (NIELSEN, 2005).

- Medida - uma característica importante que também deve ser citada é referente ao princípio de incerteza de Heisenberg. Conforme Heisenberg, ao se fazer a medida de duas características de uma partícula elementar, aumentar a certeza de uma medição das características irá acarretar na incerteza da medição da outra característica. O exemplo mais conhecido deste princípio é referente ao elétron de um átomo. Não se pode determinar precisamente a posição e a velocidade de um elétron em um determinado instante: ou se determina um ou outro, precisamente (Júnior, 2005). Ou seja, não é possível determinar as duas características ao mesmo tempo.

Para descrever matematicamente a mecânica quântica, precisamos compreender a maneira como os corpos são representados, através da notação de Dirac e onde estes corpos existem, em um referencial chamado Espaço de Hilbert, o qual nos fornecerá base para toda uma representação dos elementos envolvidos neste trabalho.

### 2.2.1 Notação de Dirac

Também conhecida como Notação Bra-Ket (SALMERON, 2007), descreve espaços vetoriais mais adaptada à álgebra matemática pura e abstrata, sendo bastante utilizada na mecânica quântica na representação de um estado físico do sistema.

O nome Bra-ket vem do produto interno de dois estados, a parte esquerda  $\langle\psi|$  chamada *bra*, ou vetor linha, e a parte direita  $|\phi\rangle$  denominada *ket*, ou vetor coluna. Os valores  $\psi$  e  $\phi$  representam elementos de uma base ortonormal geradora do espaço vetorial em questão. O produto interno resultante (o Bra-ket) é escrito como  $\langle\psi|\phi\rangle$ . Note que o produto interno representa um número, pois é a multiplicação de um vetor linha por um vetor coluna de mesmas dimensões.

Seja  $A$  um operador (i.e, uma matriz), denota-se  $|\psi\rangle$  seus autoestados, de modo que

$$A|\psi\rangle = \alpha_\psi|\psi\rangle$$

onde os números  $\alpha_\psi$  são os autovalores, ou coeficientes de  $|\psi\rangle$ . A aplicação de  $A$  em  $|\psi\rangle$  pode ser calculada por multiplicação de matriz vetor diretamente.

Na mecânica quântica a expressão  $\langle\psi|\phi\rangle$  (coeficiente para a projeção de  $\psi$  em  $\phi$ ) é geralmente interpretado como amplitude de probabilidade para o estado  $\psi$  para o colapso no estado  $\phi$ .

### 2.2.2 Espaço de Hilbert

O Espaço de Hilbert representa matematicamente um espaço vetorial  $H$ , definido sobre números complexos com algumas propriedades, como as que seguem (ALVES, 2003):

- se dois vetores  $|f\rangle, |g\rangle \in H$ , então  $|f\rangle + |g\rangle$  também é um vetor de  $H$ ;
- a soma é comutativa:  $|f\rangle + |g\rangle = |g\rangle + |f\rangle$ ;
- a soma é associativa:  $(|f\rangle + |g\rangle) + |h\rangle = |f\rangle + (|g\rangle + |h\rangle)$
- existe em  $H$  um vetor nulo tal que  $|f\rangle + 0 = |f\rangle, \forall |f\rangle \in H$
- se  $\alpha$  e  $\beta$  são números complexos e  $|f\rangle, |g\rangle$  são elementos de  $H$ , então:

(a)  $\alpha|f\rangle \in H$

(b)  $(\alpha\beta|f\rangle) = \alpha(\beta|f\rangle)$

(c)  $(\alpha + \beta)|f\rangle = \alpha|f\rangle + \beta|f\rangle$

(d)  $\alpha(|f\rangle + |g\rangle) = \alpha|f\rangle + \alpha|g\rangle$

(e)  $1 \cdot |f\rangle = |f\rangle$

Uma operação entre dois vetores de  $H$ ,  $|f\rangle$  e  $|g\rangle$ , chamada produto interno, fornece um escalar como resultado:  $\langle f|g\rangle$ . Este escalar resultante possui as seguintes propriedades:

i)  $\langle f|g\rangle = \langle g|f\rangle^*$  (\*) (\*)

ii)  $\langle f|, |g\rangle + |h\rangle = (\langle f|, |g\rangle) + (\langle f|, |h\rangle)$

iii)  $\langle f|, \alpha|g\rangle = \alpha(\langle f|, |g\rangle)$

iv)  $\alpha\langle f|, |g\rangle = \alpha^*(\langle f|, |g\rangle)$

v)  $\langle f|, |f\rangle \geq 0$ , e  $(\langle f|, |f\rangle) = 0$  se  $|f\rangle = 0$  (vetor nulo)

---

\* $I^*$  é o complexo conjugado de  $I$

## 2.3 Axiomas da Mecânica Quântica

A teoria quântica é uma representação do mundo físico onde os elementos e seus comportamentos são descritos por: estados, observáveis, medida, e evolução temporal (dinâmica).

A seguir discute-se brevemente os axiomas da mecânica quântica relativos às características mencionadas acima.

### 2.3.1 Estados

A definição do estado quântico possui diferentes interpretações, conforme Pessoa,(Júnior, 2005):

- interpretação ondulatória,
- interpretação corpuscular,
- interpretação dualista realista e
- interpretação da complementaridade.

Porém neste trabalho nos limitamos a dar a seguinte interpretação para estado quântico: um estado quântico é um estado possível, em que um sistema mecânico quântico possa se encontrar em determinado instante. Um estado quântico é representado por uma função de onda, no *espaço de Hilbert* e descrito por um *ket* denotado por  $|\alpha\rangle$  plenamente especificado pode ser descrito por um vetor de estado, por uma função de onda ou por um conjunto completo de números quânticos para um dado sistema (Júnior, 2005).

### 2.3.2 Observáveis

De acordo com o formalismo quântico, toda grandeza física mensurável  $Q$ , chamada *observável*, é descrita no espaço de Hilbert por um “operador auto-adjunto”  $\hat{Q}^\dagger$

---

<sup>†</sup>Operador auto-adjunto é um operador linear em um espaço vetorial com produto interno adjunto de si mesmo, ou seja, igual à

$$\langle Tx, y \rangle = \langle x, Ty \rangle, \forall x, y$$

(JÚNIOR, 2005). Em mecânica quântica, um observável pode ser representado por um operador Hermitiano  $A^\dagger$ , atuando no espaço vetorial em questão:

$$|a'\rangle, |a''\rangle, |a'''\rangle, \dots$$

com a propriedade

$$A|a'\rangle = a'|a'\rangle, A|a''\rangle = a''|a''\rangle, \dots$$

onde  $a', a'', \dots$  são números reais, chamados *autovalores* do operador  $A$ .

### 2.3.3 Medições

“Outra propriedade importante dos operadores auto-adjuntos é que seus autovetores formam um conjunto ortogonal, que fornece uma base ortonormal para  $H$  (espaço vetorial de Hilbert). Sendo assim, é sempre possível escrever um estado qualquer de um sistema quântico em termos dos autovetores de um observável  $A$ .

Sejam então  $|a_1\rangle, |a_2\rangle, \dots |a_n\rangle$  os autovetores de  $A$ , associados aos autovalores  $a_1, a_2, \dots a_n$ . Se o sistema está num estado qualquer  $|\psi\rangle$ , sempre podemos escrever

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i |a_i\rangle$$

.

Um dos postulados da mecânica quântica diz que, se fizermos um experimento para medir qual valor da grandeza física associada ao operador  $A$  que o sistema possui quando está no estado  $|\psi\rangle$ , encontraremos o autovalor  $a_i$  com probabilidade  $\|\alpha_i\|^2$ . Um outro postulado afirma que, após uma medida, o estado do sistema passa a ser descrito pelo autoestado de  $A$  associado ao

---

<sup>‡</sup>Um operador Hermitiano  $A$  é um operador linear sobre um espaço de Hilbert  $V$ , tal que exista um único  $A^t$  sobre  $V$  para todo vetor  $|v\rangle, |w\rangle \in V$ .

$$(|v\rangle, A|w\rangle) = (A^t|v\rangle, |w\rangle).$$

Por convenção, se  $|v\rangle$  é um vetor, então definimos  $|v\rangle^t = \langle v|$ . Com essa definição podemos ver que  $(A|v\rangle)^t = \langle v|A^t$ .



autovalor que foi o resultado da medida. Este fato é conhecido como o *colapso do estado quântico*. Se novas medidas de  $A$  forem feitas, os resultados serão sempre  $a_l$ , com probabilidade 1.” (ALVES, 2003)

#### 2.3.4 Dinâmica

A evolução temporal de um sistema quântico *fechado* é descrito por uma transformação unitária que é o estado  $|\alpha\rangle$  do sistema no tempo  $t_1$  está relacionado ao estado  $|\alpha'\rangle$  do sistema no tempo  $t_2$  pelo operador unitário  $U$  §:

$$|\alpha'\rangle = U |\alpha\rangle.$$

Este operador linear é reversível.

#### 2.3.5 Composição de Estados

A composição de estados pode ocorrer através do produto tensorial de dois espaços vetoriais de modo a aumentar o espaço vetorial de estados quânticos.

Suponha que  $V$  e  $W$  são espaços vetoriais de Hilbert de dimensão  $m$  e  $n$  respectivamente. Então,  $V \otimes W$  ( $V$  tensorial de  $W$ ) é um espaço vetorial de dimensão  $m \times n$ . Usa-se a notação  $|vw\rangle$  (onde  $v$  e  $w$  são vetores de  $V$  e  $W$ ) para indicar o produto tensorial  $|v\rangle \otimes |w\rangle$ . A representação de estados emaranhados deixa explícito o emaranhamento como um produto tensorial, por exemplo, o emaranhado  $|00\rangle$  é um produto tensorial entre dois estados:  $|0\rangle \otimes |0\rangle$ .

### 2.4 Aplicações da Computação Quântica

Um processador quântico é capaz de realizar várias operações simultaneamente pelo uso de sua característica de sobreposição dos estados (ou endereços de memória quânticos). É possível, por exemplo, avaliar todas as possíveis entradas de uma função de uma única vez, devido a linearidade das operações. Particularmente, essa característica é utilizada na solução quântica para fatoração de números primos (SHOR, 1997). A atual tecnologia de criptografia é baseada na geração de chaves por multiplicação de números primos muito grandes. A segurança nas chaves de criptografia reside no fato de que determinar estes números primos para fazer a conferência é uma tarefa computacional

---

§  $T : V \rightarrow V$  é chamado de operador unitário se  $T^* = T^{-1}$ , ou ainda,  $TT^* = T^*T = I(\text{identidade})$

muito grande, tornando o tempo de resolução tão grande que sua solução é muito maior que um usuário viveria para quebrar a senha. Uma chave de 56 bits é quebrada em 50% com força bruta em média de 1 minuto. Uma chave de 128 bits é quebrada em 1% com força bruta em 146 milhões de anos, 50% em 8 trilhões de anos (BURNETT, 2002). Em 1994, Peter Shor (SHOR, 1997), um cientista computacional teórico, desenvolveu um algoritmo que permite a um computador quântico fatorar grandes números inteiros em tempo polinomial. Com este algoritmo, em teoria, é possível quebrar a maioria dos sistemas criptográficos utilizados atualmente. Mas não somente na quebra de senhas é um campo onde a computação quântica flerta com a criptografia: também na cifragem dos dados existe possibilidade do uso das propriedades quânticas aumentando a eficiência dos sistemas criptográficos (SHOR, 1996).

A técnica que engloba conceitos da criptografia e a teoria quântica é anterior à descoberta da criptografia de Chave Pública. Em 1970, Stephen Wiesner escreveu um artigo intitulado “Conjugate Coding”(WIESNER, 1983) onde explica como a teoria quântica pode unir duas mensagens em uma transmissão na qual o receptor poderia decodificar cada uma das mensagens porém nunca as duas simultaneamente, pela impossibilidade de violar um dos princípios da mecânica quântica (o princípio de incerteza de Heisenberg).

Apesar do nome Criptografia Quântica já ter se tornado comum no meio científico, na realidade ela engloba apenas a troca segura de chaves, utilizando para isso, princípios da Mecânica Quântica, mais precisamente, a natureza quântica dos fótons. É preciso, portanto, utilizar métodos clássicos para a troca da mensagem propriamente dita. Devido a isso, a Criptografia Quântica também é conhecida como Distribuição Quântica de Chaves ou QKD (Quantum Key Distribution)(BENNETT; BRASSARD, 1984).

Neste contexto, a Computação Quântica, em analogia com Computação Clássica, é a realização da tarefa de processamento da informação através da utilização de um sistema físico quântico. Utilizando as propriedades quânticas, podem-se ter computadores consideravelmente mais velozes.

Assim, existe uma grande área de pesquisa buscando a construção de computadores quânticos. A dificuldade principal é devido à complexidade de manipulação de estruturas

tão pequenas como átomos. A nanotecnologia (DREXLER, 1986), com a fabricação de nanodispositivos, é a uma das áreas que estão contribuindo para tal realização.

A Computação Quântica é baseada na manipulação da unidade de informação quântica, o qubit. O qubit pode armazenar o valor “1”, “0” ou a sobreposição destes (ou seja, ter o valor 1 e zero ao mesmo tempo armazenados). Considerando o qubit existindo no *espaço de Hilbert* e utilizando a *notação de Dirac*, na mecânica quântica, o estado de um qubit pode ser expresso por:

$$|\phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (2.1)$$

desde que

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

onde  $\alpha$  e  $\beta$  são as amplitudes de probabilidades da ocorrência do valor 0 ou 1 respectivamente no qubit. Com a possibilidade de armazenar infinitos valores (alfa e beta) relativos aos estados zero e um, então uma única posição de memória quântica pode armazenar um número muito maior de informações do que um bit clássico.

Um qubit também pode associar-se a outros qubits formando um *estado emaranhado* e fazendo-se computação com estes estados emaranhados, é possível resolver problemas em um tempo muito menor, pois se lendo apenas algumas posições de memória quântica é possível encontrar o valor de todas as restantes.

Um dos problemas da memória quântica é que a leitura destrói parte da informação contida nos qubits, ou seja, o valor  $\alpha$  e  $\beta$  não podem ser determinados simultaneamente na medição do conteúdo do qubit. Além disto, quando mais de um qubit estiverem associados, eles podem armazenar não somente um valor no intervalo de tempo, mas sim todos os valores possíveis para  $n$  qubits no mesmo, e a medida de um qubit apenas, destrói a informação de todos os outros qubits emaranhados.

#### 2.4.1 Algoritmo de Grover

Como muitos algoritmos quânticos, o algoritmo de Grover é probabilístico, no sentido em que dá a resposta correta com alta probabilidade. A probabilidade de falha pode ser

diminuída pela repetição da execução do algoritmo(HILL, 1996).

Embora o objetivo do algoritmo de Grover é descrito como “pesquisar uma base de dados não ordenada”, pode ser mais correto descrevê-lo como “para inverter uma função”. Grosseiramente, se temos uma função  $y = f(x)$  que pode ser avaliada em um computador quântico, este algoritmo permite calcular  $x$  quando fornecido o  $y$ . A inversão de função está relacionada com a busca de uma base de dados, porque nós poderíamos chegar a uma função que produz um determinado valor de  $y$  se  $x$  corresponde a uma entrada em um banco de dados desejado, e um outro valor de  $y$  para outros valores de  $x$ .

O algoritmo de Grover também pode ser usado para resolver problemas NP-completo realizando pesquisas exaustivas sobre o conjunto de possíveis soluções. Isso resultaria em uma grande velocidade ao longo das soluções clássica.

Abaixo, é apresentada a forma básica do algoritmo de Grover, que procura por uma única entrada correspondente. O algoritmo pode ser otimizado se houver mais de uma entrada correspondente ao número de entradas, se estas forem conhecidas.

Considere uma base de dados não ordenados com  $N$  entradas. O algoritmo requer um  $N$ -dimensional espaço de estados  $H$ , que pode ser fornecida por  $\log_2 N$  qubits.

São fornecidos os números de entradas de dados  $1, 2, \dots, N$ . Escolhe-se um observável,  $\Omega$ , em  $H$ , com  $N$  distintos autovalores cujos valores são todos conhecidos. Cada um dos autovetores de  $\Omega$  codifica uma das entradas na base de dados, de uma maneira que será descrita abaixo. Denota-se os autovetores como:

$$\{|1\rangle, |2\rangle, \dots, |N\rangle\}$$

com autovetores correspondentes:

$$\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$$

Existe ainda um operador unitário,  $U_w$ , que atua como uma subrotina que compara as entradas de dados, de acordo com algum critério de pesquisa. O algoritmo não especifica como a subrotina funciona, mas deve haver uma subrotina quântica que trabalha com

sobreposição de estados. Além disso, ele deve agir especialmente sobre um dos autovetores,  $|\omega\rangle$ , que corresponde à entrada da base de dados ligada ao critério de consulta. Para ser mais preciso, é necessário  $U_w$  para ter os seguintes efeitos:

$$U_w|\omega\rangle = -|\omega\rangle$$

$$U_w|x\rangle = |x\rangle \text{ para todos } x \neq \omega$$

ou

$$\langle\omega|\omega\rangle = 1$$

$$\langle\omega|x\rangle = \langle x|\omega\rangle = 0$$

$$U_w|\omega\rangle = (I - 2|\omega\rangle\langle\omega|)|\omega\rangle = |\omega\rangle - 2|\omega\rangle\langle\omega|\omega\rangle = -|\omega\rangle$$

$$U_w|x\rangle = (I - 2|\omega\rangle\langle\omega|)|x\rangle = |x\rangle - 2|\omega\rangle\langle\omega|x\rangle = |x\rangle$$

Nosso objetivo é identificar esse autovetor  $|\omega\rangle$ , ou equivalently o autovalor  $w$ , que atua especialmente sobre  $U_w$ .

Também podemos escrever:

$$\langle\omega|s\rangle = \langle s|\omega\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

$$\langle s|s\rangle = N \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{1}{\sqrt{N}} = 1$$

$$U_w|s\rangle = (I - 2|\omega\rangle\langle\omega|)|s\rangle = |s\rangle - 2|\omega\rangle\langle\omega|s\rangle = |s\rangle - \frac{2}{\sqrt{N}}|\omega\rangle$$

$$U_s(|s\rangle - \frac{2}{\sqrt{N}}|\omega\rangle) = (2|s\rangle\langle s| - I)(|s\rangle - \frac{2}{\sqrt{N}}|\omega\rangle) = 2|s\rangle\langle s|s\rangle - |s\rangle - \frac{4}{\sqrt{N}}|s\rangle\langle s|\omega\rangle + \frac{2}{\sqrt{N}}|\omega\rangle =$$

$$2|s\rangle - |s\rangle - \frac{4}{\sqrt{N}} \cdot \frac{1}{\sqrt{N}}|s\rangle + \frac{2}{\sqrt{N}}|\omega\rangle = |s\rangle - \frac{4}{N}|s\rangle + \frac{2}{\sqrt{N}}|\omega\rangle = \frac{N-4}{N}|s\rangle + \frac{2}{\sqrt{N}}|\omega\rangle$$

Após a aplicação dos dois operadores ( $U_w$  e  $U_s$ ), a amplitude do comparador com o elemento é aumentada. E esta é uma iteração de Grover  $r$ .  $N = 2^n$ ,  $n$  é o número de *qubits* em estado vazio (zero).

Passos do algoritmo:

Inicializa-se o sistema no estado:

$$|s\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{x=1}^N |x\rangle$$

Aplica-se o iterador de Grover  $r(N)$  vezes. A função  $r(N)$  é dada por:

Aplica o operador  $U_w = I - 2|w\rangle\langle w|$

Aplica o operador  $U_s = 2|s\rangle\langle s| - I$

Finalmente aplica-se uma medição  $\Omega$  resultando em  $\lambda_w$  com probabilidade 1 para  $N \geq 1$ . De  $\lambda_w$  pode ser obtido  $w$ .

#### 2.4.2 Algoritmo de Deutsch

O algoritmo de Deutsch é utilizado para determinar se uma função booleana  $f$  é constante ou balanceada. Para resolver este problema, classicamente, é necessário avaliar  $f(0)$  e  $f(1)$  e então comparar os resultados. Com o algoritmo de Deutsch a resolução do problema é feita com somente uma avaliação de  $f$ .

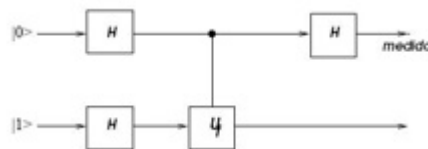


Figura 2.2 – Circuito quântico para o algoritmo de Deutsch

O fluxo de informação no circuito quântico<sup>¶</sup> representado pela figura 2.2 ocorre da esquerda para à direita, onde as linhas são os conectores que carregam os *qubits* pelo circuito e as caixas quadradas, normalmente, representam as portas lógicas, que efetuam as operações quânticas. Existe também uma porta para representar a medida do estado quântico (não representada nesta figura). Os estados quânticos escritos à esquerda do circuito representam as condições iniciais.

---

<sup>¶</sup>Uma descrição detalhada sobre os circuitos quânticos pode ser encontrada na Seção 1.3.4 de (NIELSEN, 2005)

Formalmente,  $H$  é a porta de Hadamard. O significado dessa porta é uma rotação no qubit para o ângulo exato entre FALSE and TRUE:

$$\begin{aligned} H|0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} = (|0\rangle + |1\rangle) = |+\rangle \\ H|0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} = (|0\rangle - |1\rangle) = |-\rangle \end{aligned}$$

A segunda porta que aparece no circuito é a porta  $U_f$ , i.e., é uma transformação unitária que executa a mesma computação que  $f$ . Em geral,  $f$  não é uma função reversível, entretanto sempre é possível construir uma operação unitária (reversível) a partir de uma função qualquer  $f$ . A idéia é que podemos utilizar alguns qubits auxiliares (*heap*) para não perder os valores de entrada. Para a função booleana  $f$  é possível construir uma operação unitária utilizando dois qubits:

$$F|x\rangle|y\rangle = |x\rangle|y \oplus f(x)\rangle$$

Para  $F$  temos (pela definição):

$$\begin{aligned} F|x\rangle|0\rangle &= |x\rangle|f(x)\rangle \\ F|x\rangle|1\rangle &= |x\rangle|1 \oplus f(x)\rangle \end{aligned}$$

Temos ainda:

$$|+\rangle|-\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$$

Para calcular  $F|+\rangle|-\rangle$ , se  $F(x) = 0$ , então  $F|x\rangle|-\rangle = \frac{1}{2}|x\rangle(|0\rangle - |1\rangle)$ , e se  $F(x) = 1$ , então  $F|x\rangle|-\rangle = \frac{1}{2}|x\rangle(|1\rangle - |0\rangle)$ .

Consequentemente:

$$F|x\rangle|-\rangle = \frac{(-1)^{f(x)}}{\sqrt{2}}|x\rangle(|0\rangle - |1\rangle) = (-1)^{f(x)}|x\rangle|-\rangle$$

Logo:

$$F|+\rangle|-\rangle = \frac{1}{2}(F|0\rangle|-\rangle + F|1\rangle|-\rangle) \Rightarrow |\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \pm |1\rangle)$$

Então, será obtido  $|+\rangle$  se a função for balanceada enquanto  $|-\rangle$  se a função for constante. Então o computador quântico resolveria o problema com apenas uma execução para encontrar a solução. A atuação sobre os estados sobrepostos fornece uma visão global do problema e o processamento consequente se torna mais ágil, não limitado por percorrer uma por uma as possibilidades e depois formular a solução.

## 2.5 Sumário

Este Capítulo faz uma breve abordagem sobre a computação quântica, sua importância no aumento de performance na solução de problemas computacionais e sua fundamentação teórica baseada na mecânica quântica. São apresentados os axiomas da computação quântica e feito um primeiro contato com a notação para representação do comportamento dos qubits. Concluída esta abordagem, o trabalho segue com a apresentação da teoria quântica Orch OR no Capítulo seguinte. Para um estudo mais aprofundado sobre a computação quântica, é recomendada a leitura de (MERMIN, 2007) que explica com mais detalhes quebra de encriptação, correção de erro quântico e protocolos com qubits, assuntos os quais fogem do escopo deste trabalho.



### 3. Orchestrated Objective Reduction - Orch OR

Este capítulo tem como objetivo apresentar a teoria quântica Orch OR, formulada por Roger Penrose e Stuart Hameroff. No seu trabalho de apresentação da teoria (HAMEROFF, 1996) os autores fazem uma descrição de propriedades quânticas de uma estrutura intracelular (o microtúbulo neural) na espécie humana. Para a compreensão deste conceito, uma nanomáquina quântica é responsável pelo processamento dos sinais sinápticos e é este processamento que o presente trabalho se propõe a modelar e simular. Para tanto, apresenta-se em detalhes a teoria de Penrose e Hameroff. São discutidos os conceitos de tubulina e seu comportamento quântico. Então, os microtúbulos, constituintes do citoesqueleto dos neurônios cerebrais, são apresentados. Finalmente, discorre-se sobre o fenômeno do processamento de informação nos microtúbulos.

#### 3.1 A teoria Orch OR

O modelo biológico quântico foi apresentado primeiramente por Roger Penrose, em 1989, no livro *The Emperor New Mind* (PENROSE; GARDNER, 1999). Neste livro, Penrose apresenta uma idéia de conexão entre o cérebro e a mente. A mente seria um fenômeno criado por um evento mecânico-quântico não facilmente compreendido no interior dos neurônios.

Suas pesquisas anteriores sobre o funcionamento da 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”.

A consciência “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 realidade” (FREEDMAN, 1994). Penrose então uniu seu conceito de consciência com a mecânica quântica, colocando liberdade no processo da formação do consciente, liberdade esta ligada a característica probabilística da mecânica quântica. O funcionamento da formação de consciência, que Penrose não conseguia modelar computacionalmente utilizando somente uma metodologia clássica da computação, utilizando os conceitos da mecânica quântica poderiam ser melhor explicados. O processo físico não-computável no cérebro responsável pela formação da consciência estaria ligado à característica de

escolha aleatória do colapso de onda da mecânica quântica.

Em *The Emperor New Mind* não há detalhamento do funcionamento da escolha que o cérebro efetua quando escolhe uma solução “correta” entre os vários cenários possíveis quando formalizamos um pensamento consciente. O motivo de este cenário específico ser a opção entre os demais é algo que possivelmente tem relacionamento com algum tipo de concordância existente entre padrões na mente.

Stuart Hameroff, desde o início da década de 1970 interessou-se pelo estudo dos microtúbulos no processo de sinalização da divisão celular. Quando no Centro Médico de Tucson estudou anestesiologia motivado pela idéia de que quando anestésias são inaladas elas desligam a consciência momentaneamente sem prejudicar o cérebro aparentemente, pela ação de deformar os microtúbulos dos neurônios.

Após 1982, Hameroff uniu a idéia de sinalização celular de microtúbulos, formação de consciência e transporte de sinais intracelulares nos neurônios. A sinalização intracelular nos neurônios seria feita pelos microtúbulos (Figura 3.1). Na figura, é possível identificar a rede de microtúbulos distribuída no citoplasma neural, funcionando como um “cabeamento” para a transmissão dos sinais sinápticos.

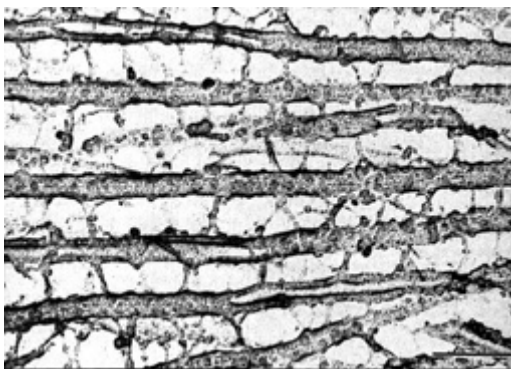


Figura 3.1 – Microtúbulos no citoplasma neural.

Fonte: [http](http://www.quantumconsciousness.org) :

[//www.quantumconsciousness.org](http://www.quantumconsciousness.org)

Segundo a teoria de Penrose, os microtúbulos seriam o local ideal para ocorrer os efeitos quânticos a nível neural, tais como sobreposição e emaranhamento. Existem diferentes opiniões de como estados quânticos sobrepostos sofrem “colapso” ou “redução” a um único estado clássico. A visão convencional da teoria quântica (interpretação de Copenhague (Júnior, 2005)) é a de que o estado quântico se reduz pela medição ambiental

ou observação consciente (redução subjetiva: SR, ou R). Onde uma partícula quântica está e como ela está se movendo quando observada é denominada sua “indeterminação” e, de acordo com a interpretação de Copenhagem, resulta em valores aleatórios além de serem excludentes na hora da medição. Ou se tem o valor de um ou de outro, ambos ao mesmo tempo é impossível de se determinar (ver Seção 2.2).

Penrose e Hameroff definiram uma nova teoria para explicação do fenômeno do colapso. Basicamente, na sua teoria, sistemas quânticos coerentes podem “autocolapsarem” por crescimento (chamada redução objetiva: OR)(HAMEROFF, 1996), i.e., atingindo uma massa crítica energética os estados colapsam de acordo com a gravidade quântica (HAMEROFF, 2007; GRECO, 2006).

Gravidade quântica é uma teoria que unifica a Mecânica Quântica com a Relatividade Geral (RIBEIRO, 2001). A Teoria das cordas é um exemplo de uma teoria de gravidade quântica (ABDALLA, 2005). Gravidade Quântica é um campo da física teórica que tenta unificar mecânica quântica, que descreve três das forças fundamentais da natureza (eletromagnetismo, interação fraca e interação forte), com a relatividade geral, a teoria da quarta força fundamental: gravidade. Ela é uma teoria física descrevendo a interação gravitacional da matéria e da energia em que matéria e energia são descritas pela teoria quântica.

Outra característica dos sistemas quânticos é a inseparabilidade quântica, ou não-localidade, que implica que todos os objetos quânticos, que uma vez interagiram entre si, então em algum sentido continuam ligados mesmo depois de afastados no espaço, como explicado no Capítulo 2. Quando dois sistemas quânticos têm interação, as suas funções de onda se tornam “em fase emaranhada” de modo que quando um sistema da função de onda é colapsado, o outro sistema da função de onda, não importa o quão distante, sofre o colapso instantaneamente. A conexão não-local - “emaranhamento quântico” - é instantânea, independente da distância e implica que entidades quânticas, através de compartilhamento de uma função de onda, são indivisíveis .

O cérebro à primeira vista parece um ambiente hostil para os delicados fenômenos quânticos que geralmente procuram isolamento e baixa temperatura (supercondução). No entanto, vários autores têm sugerido canais iônicos, íons solitários, DNA, grades pré-sinápticas e microtúbulos do citoesqueleto como bases “padrão” dos efeitos quânticos teóricos. Na opinião de Hameroff, os microtúbulos são os locais mais prováveis para a

coerência quântica, OR e formação de consciência.

Redes de proteínas auto-organizadas em polímeros, o citoesqueleto dentro dos neurônios estabelece a forma neuronal, mantém as conexões sinápticas e executa outras tarefas essenciais. Os principais elementos do citoesqueleto são os microtúbulos.

Tradicionalmente visto como elementos com função de sustentação, os microtúbulos e outras estruturas do citoesqueleto também parecem preencher papéis comunicativos e do processamento de informação. Modelos teóricos sugerem como os estados conformacionais de tubulinas, formadoras do citoesqueleto dos neurônios, podem interagir com as tubulinas vizinhas para representar, propagar e processar as informações em nível molecular como “autômatos celulares”. Hameroff e Penrose apresentam um modelo ligando os microtúbulos à consciência usando a teoria quântica de forma “realista”, como descrito em *Shadows of the Mind* (PENROSE, 1996). Em seu modelo, a coerência quântica emerge, e está isolada, nos microtúbulos cerebrais até que as diferenças na distribuição de massa-energia entre os estados sobrepostos e emaranhados das tubulinas atingem um limiar relacionado com a gravidade quântica. A resultante de autocolapso (OR), irreversível no tempo, cria um evento instantâneo. Sequências de tais eventos criam um fluxo de tempo, e de consciência.

Os autores prevêem que as ligações de microtúbulos associados à proteínas de outros microtúbulos “sintonizam” as oscilações quânticas, e “orquestram” possíveis colapsos resultantes. Assim, descrevem o autocolapso especial OR ocorrendo em microtúbulos interligados a outros microtúbulos por proteínas, e relevantes para a consciência, como “redução objetiva orquestrada” (Orch OR).

### 3.2 Tubulinas

Tubulinas são proteínas polares (dímeros) com extremidade positiva (alfa) e negativa (beta) (Figura 3.2), que se unem dinamicamente no citoplasma celular para formar os microtúbulos. Na microfotografia é possível observar que a proteína é formada por dois glóbulos, ambos polarizados. O glóbulo polarizado positivamente é chamado de  $\alpha$  – *Tubulina* enquanto o glóbulo com carga negativa é chamado de  $\beta$  – *Tubulina*.

Diferentemente das outras células, nos neurônios, ocorre uma polimerização (estado gel) do citoplasma ao redor dos microtúbulos (que serão apresentados a seguir), fornecendo o isolamento necessário das tubulinas ao meio externo, para que ocorra

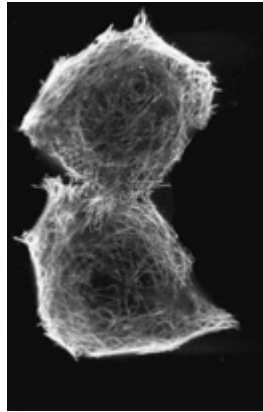


Figura 3.2 – Microfotografia do dímero da proteína Tubulina. Adaptado de [http :  
//www.aecom.yu.edu/aif/instructions/irm/index.htm](http://www.aecom.yu.edu/aif/instructions/irm/index.htm)

a livre movimentação das tubulinas (mudança de orientação dos pólos do dímero  $\alpha - Tubulina/\beta - Tubulina$ ) nas paredes dos microtúbulos (HAMEROFF, 1996).

A tubulina da Figura 3.2 é representada neste trabalho, de acordo com sua orientação polar, conforme a Figura 3.3.

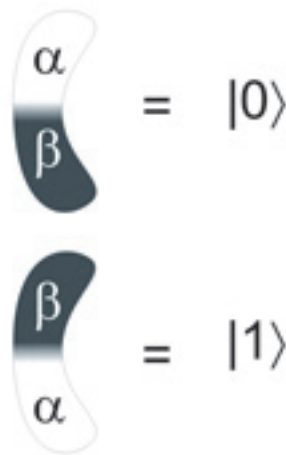


Figura 3.3 – Orientação da tubulina

Quando se unem no citoplasma, as tubulinas formam um tubo oco, o chamado microtúbulo, onde continuam unidas de acordo com a ação de proteínas ligantes que as mantêm unidas enquanto houver atividade intracelular, seja estrutural, seja de transporte de organelas ou então de transmissão de sinais.

Em (HAMEROFF, 1996) a orientação dos pólos das tubulinas nos microtúbulos atua como chave para o envio (ou não) dos sinais sinápticos dentro do citoplasma neural.

Na parede do microtúbulo, as tubulinas possuem um arranjo onde possuem seis outras tubulinas vizinhas, exceto no início e final do microtúbulo.

### 3.3 Microtúbulos Celulares

Os microtúbulos são cilindros poliméricos ocos de proteínas conhecidas como tubulinas. Microtúbulos estão interligados através de ligações protéicas (microtúbulos associados a proteínas: MAPs) a outros microtúbulos e a outras estruturas celulares para formar redes de citoesqueleto. Microtúbulos são estruturas intracelulares multifuncionais: formam o citoesqueleto, participam do transporte citoplasmático de organelas, controlam o processo de divisão celular, associam-se com proteínas motoras permanentemente para prover energia a movimentos ciliares em cílios e flagelos e transmissão de sinais (BRUCE, 1999).

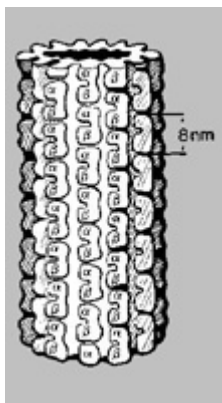


Figura 3.4 – Microtubulo

O cilindro do microtúbulo (Figura 3.4) é formado por 13 tubulinas paralelas e mantidos dinamicamente por montagem e desmontagem, podendo ter membrana externa de proteção. Microtúbulos exibem comportamentos de crescimento e decrescimento dinâmicos por meio de polimerizações e despolimerizações, repetidas vezes permitindo à rede de microtúbulos se reestruturar rapidamente para exercer suas funções (CLIFFORD; DAVID, 2007).

### 3.4 Microtúbulos Neurais

No modelo ORCH OR, a formação da mente (consciência) é feita no interior das células do cérebro, nos neurônios, mais precisamente nos microtúbulos. Os microtúbulos neurais com a característica particular de não possuir membrana externa, têm suas

tubulinas com livre conformação, ou seja, as tubulinas podem movimentar-se livremente na parede do microtúbulo. O microtúbulo funciona como um canal por onde transitam as cargas elétricas provenientes dos sinais sinápticos. A transmissão da carga é direcionada de acordo com a orientação da carga das tubulinas do microtúbulo e estas atuam como chaves na transmissão ou não transmissão de sinais elétricos através do citoplasma dos neurônios. A polarização de cada tubulina é definida pelo conjunto de forças eletrostáticas de suas seis tubulinas vizinhas.

Sob determinadas condições de atração eletroestática de tubulinas vizinhas, e em determinados intervalos de tempo (aqueles intervalos onde existe coerência de estado da tubulina), a polarização das tubulinas não pode ser determinada, quando então Hameroff e Penrose definem esta indeterminação como uma sobreposição de estados da tubulina. Se uma região do microtúbulo com várias tubulinas vizinhas entrar em sobreposição num intervalo de tempo de até 500 milissegundos (HAMEROFF, 1996) então esta região está em um estado emaranhado que sofre colapso quando atuado 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 protéicas destes microtúbulos.

Para o processamento quântico, o citoplasma ao redor do microtúbulo fica em estado “gel” para isolar o mesmo do resto do ambiente intra-celular segundo Hameroff (HAMEROFF, 1996).

Os microtúbulos auto montam-se e desmontam-se dinamicamente (HAMEROFF, 1996). Os diferentes mecanismos que assumem a sua montagem e das proteínas associadas à microtúbulos (MAP) determinam a forma da célula e sua função, incluindo as conexões sinápticas nos neurônios. A arquitetura celular (e conexões sinápticas) pode adaptar-se rapidamente pela desmontagem dos microtúbulos, e posterior remontagem e formação de uma rede MAP em outra forma ou direção. Muitas funções de organização dos citoesqueleto são realizadas por MAPs. Alguns MAPs (dineína, quinesina) funcionam como motores e transportam material ao longo microtúbulos (transportes axoplásmico)(BRUCE, 1999).

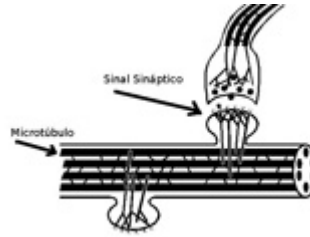


Figura 3.5 – Entrada de Sinal em um neurônio

### 3.5 Processamento de informação nos microtúbulos.

O microtúbulo neural é uma nanomáquina quântica, medindo 10nm de diâmetro e desde poucos nanômetros até microns de comprimento, regida pela interação das tubulinas (os qubits da máquina quântica) com sua vizinhança, tendo como entrada o sinal sináptico (mais precisamente as suas cargas) e obtendo como saída impulsos elétricos que irão transitar para outros neurônios do sistema nervoso e desencadeando reações aos estímulos de entrada do próprio sistema (ver o processo na Figura 3.5)(HAMEROFF, 2007). O ponto chave da teoria ORCH OR, a formação da consciência, é uma característica particular do processamento do microtúbulo neural no momento em que suas tubulinas emaranhadas sofrem o colapso.

Um detalhamento deste processo ocorre na Figura 3.6, em *A* pode ser visto a disposição das tubulinas de um microtúbulo matricialmente e as respectivas atividades cerebrais associadas em *B*. Se for compreendido que o sinal sináptico é recebido pelo microtúbulo a partir do alto da matriz de tubulinas e o resultado de seu processamento é obtido na parte inferior desta mesma matriz, então podemos descrever assim a seguinte sequência de processamento em um microtúbulo:

- A1** Uma simulação na qual uma computação clássica leva ao aparecimento de superposição quântica coerente (e da computação quântica - passos 2 e 3) em certas tubulinas - cor cinza.
- A2** Uma quantidade de tubulinas inicia o processo de superposição (em cor cinza) em processo pré-consciente da teoria. Neste passo, toda a informação está sendo computada sem no entanto gerar um resultado de saída no microtúbulo e consequentemente, propagado ao resto do sistema nervoso. Quando uma área do microtúbulo contém tubulinas vizinhas em sobreposição, estas tubulinas comportam-se em bloco (ressonam) e este comportamento coletivo as torna em



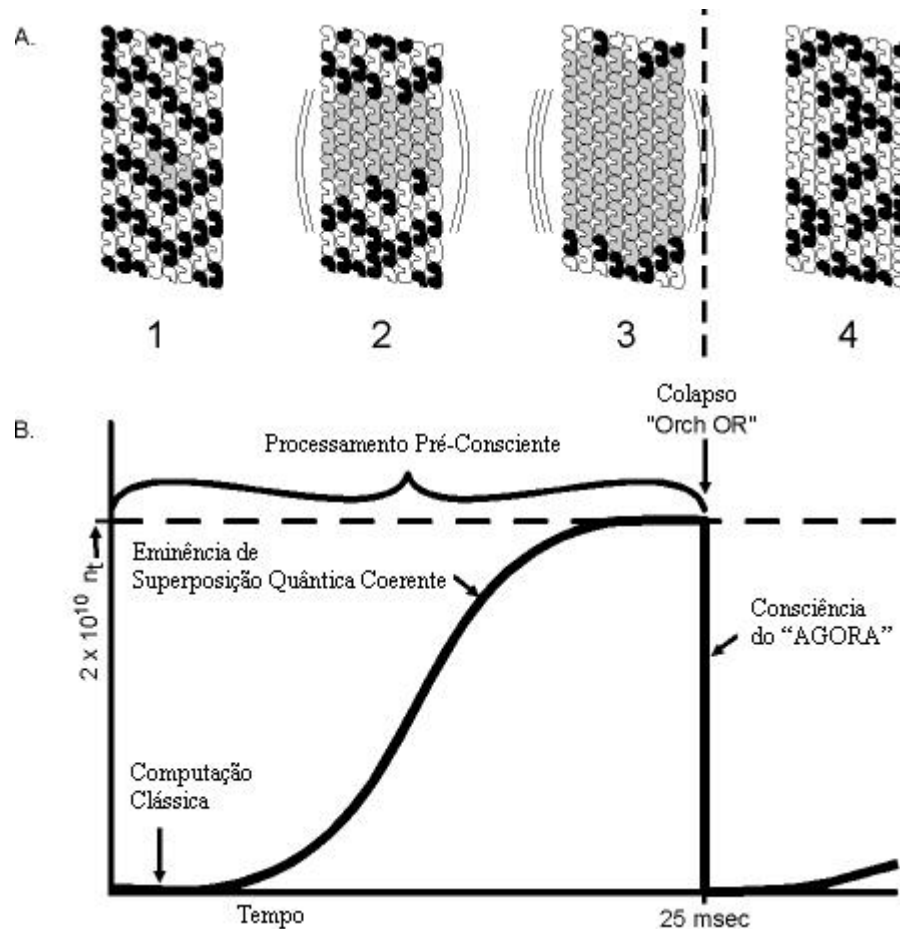


Figura 3.6 – A formação da consciência segundo Hameroff

estado emaranhado.

**A3** A quantidade de tubulinas em superposição atinge um limiar crítico, ou seja, a quantidade de massa das proteínas envolvidas no processo de sobreposição é grande o suficiente para sofrer ação relacionada com uma gravidade quântica para auto colapsar a própria superposição (Orch OR)

**A4** Ocorre o colapso entre os passos A3 e A4 (Orch OR) e o estado das tubulinas neste estágio são escolhas não computáveis do colapso quântico, que evoluem para uma computação clássica.

Na Figura 3.6 também é possível observar a correlação entre o tempo da evolução temporal dos microtúbulos e o número de tubulinas envolvidas no processo de computação. O tempo para a conformação clássica transitar por processamento quântico e retornar ao clássico novamente é da ordem de 25 ms, enquanto o número máximo de tubulinas envolvidas no processamento dos sinais sinápticos (consequentemente criando

a gravidade quântica necessária para o autocolapso de Orch OR) é de  $10^9$  tubulinas.

### 3.6 Sobreposição de Tubulinas e emaranhamento

O deslocamento do eixo Norte-Sul (N-S) \* das tubulinas (Figura 3.7) causa indeterminação de qual a polaridade assumida pelo dímero, ou seja, se num determinado instante ele é descrito por  $|0\rangle$  ou  $|1\rangle$  (conforme a Figura 3.3). Como o dímero possui livre movimentação (pode deslocar seus pólos  $360^\circ$  a partir do Norte do hexágono representativo da vizinhança), este deslocamento ocorre com uma certa frequência e que é responsável pela base da teoria da formação do pensamento, segundo Hameroff.

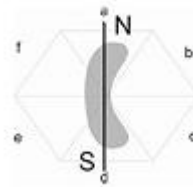


Figura 3.7 – Eixo de orientação de uma tubulina

Quando a força exercida pela vizinhança for relativamente alta, o valor é suficientemente para deslocar as tubulinas em  $180$  graus de forma que a mudança de orientação continua indicando uma polaridade  $|0\rangle$  ou  $|1\rangle$ , porém em determinados arranjos de vizinhança, a força de atração das tubulinas vizinhas não consegue ser a necessária para as tubulinas completarem os  $180^\circ$ . Então, nesta condição, a nova orientação da tubulina não pode ser representada por  $|0\rangle$  ou  $|1\rangle$  e sim uma combinação destes estados, conforme a Equação 2.1 (Seção 2.4). Nestas circunstâncias, quando o deslocamento do dímero o torna orientado em uma posição diferente do eixo N-S, então conforme a teoria Orch OR este dímero é descrito como em sobreposição dos estados  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$ . Com a evolução temporal, as tubulinas vizinhas na parede do microtúbulo começam a entrar também em conjunto com o dímero sobreposto em sobreposição. O dímero sobreposto não causa  $F_{net}^\dagger$  aos seus vizinhos, logo, o vizinho terá uma unidade de vizinhança à menos para causar atração

---

\*O eixo N-S diz respeito ao Norte ser representado pelo lado “lado a” do hexágono que define a vizinhança da tubulina enquanto o Sul representa o “lado d”

$^\dagger F_{net}$  é uma força eletrostática entre as tubulinas devido à diferença de cargas elétricas entre os pólos e será explicada adiante neste trabalho.

eletroestática e com isto haverá uma força menor para causar o deslocamento do dímero no seu eixo N-S. No passar do tempo este vizinho também irá entrar em sobreposição, mas com sua variação de alinhamento no eixo N-S associada à variação do vizinho sobreposto, então estes dois vizinhos ficam num estado emaranhado.

### 3.7 Colapso das Tubulinas em sobreposição e emaranhamento

A redução OR (OR Orch) então ocorre devido a um deslocamento em massa suficiente<sup>‡</sup> neste estado (representado pela orientação dos pólos do dímero da tubulina na parede do microtúbulo), para que ele entre em uma autocolapso que de alguma forma, influencia ou controla as funções cerebrais. O colapso dos estados sobrepostos e em emaranhamento ocorre quando a soma da massa dos estados em sobreposição, atinge um valor que pode sofrer ação da gravidade. Este valor de massa está descrito em (HAMEROFF, 1996) como sendo o total de  $10^9$  tubulinas envolvidas. Particularmente nesta teoria, a gravidade envolvida no processo de colapso de estado quântico (decoerência) é aquela defendida como uma teoria unificadora de efeitos quânticos em massa e energia de pequenos e grandes corpos, a *Gravidade Quântica* (ABDALLA, 2005).

Os microtúbulos parecem ser o lugar mais provável para a ocorrência destes efeitos quânticos.

### 3.8 Sumário

Neste capítulo foi descrita a teoria de Stuart Hameroff e Roger Penrose que foca na estrutura intracelular chamada microtúbulo e cuja participação na formação da consciência humana estaria ligada com o comportamento quântico que possui em suas subunidades (as tubulinas).

Após, no Capítulo 2, ter-se apresentado conceitos básicos da mecânica quântica, este capítulo serviu para mostrar o comportamento das estruturas celulares (mais especificamente neurais) cujas propriedades parecem obedecer aquelas leis formuladas nas Seções 2.1, 2.2, 2.3, etc. Seguindo a descrição das organelas neurais, foi apresentado o modo de processamento dos sinais sinápticos que a teoria Orch OR supõe ocorrer dentro do cérebro humano.

---

<sup>‡</sup>O deslocamento de massa da tubulina diz respeito à mesma ter sua orientação espacial modificada por uma força gravitacional quântica capaz de fazer o realinhamento clássico nesta estrutura

#### 4. Autômato Celular de Rasmussen

Muitos sistemas físicos ou biológicos podem ser modelados como uma coleção de corpos que repetidamente interagem e evoluem com o tempo. Alguns sistemas podem ser modelados usando o que chamamos de autômatos celulares. O princípio da modelagem com autômatos celulares 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 <sup>\*</sup>(FOLDOC, 2008). Após serem inicializadas, as células passam por transições de estados, baseadas no estado corrente da célula bem como no estado de suas vizinhas e com regras bem definidas de transição. Um exemplo de autômato celular é o Jogo da Vida (CALLAHAN, 2005), 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 vizinhas, localizadas 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 das suas vizinhas 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.

---

<sup>\*</sup>Uma máquina de estados finitos é uma máquina abstrata que consiste em um conjunto de estados (incluindo o estado inicial), um conjunto de eventos de entrada, saída do conjunto de eventos e um conjunto de regras de transição. A função de transição utiliza o estado inicial e os eventos de entrada e retorna a saída como novo estado. Uma máquina de estados finitos também pode ser descrita como uma função que mapeia uma seqüência ordenada de eventos de entrada em uma seqüência correspondente de eventos de saída

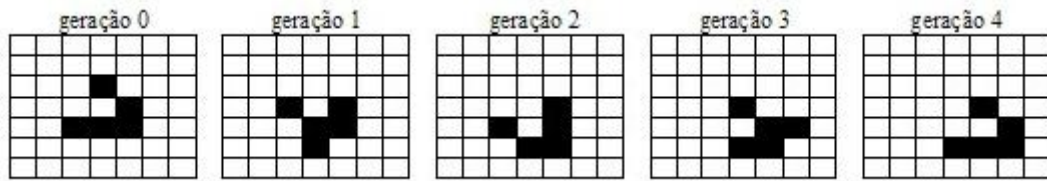


Figura 4.1 – Jogo da Vida

O processo é repetido por algum número de gerações (passos), que pode ser visualizado na Figura 4.1.

Conforme pode ser observado, cada célula da matriz possui uma vizinhança de oito outras células e seu comportamento no passar do tempo (na evolução das gerações) é regido pelas regras citadas anteriormente.

Observa-se que células vivas são representadas pelos quadrados pretos, enquanto as células mortas são mostradas nos quadrados brancos. A aplicação das regras é feita contando a quantidade de células vizinhas vivas e então tomando a decisão para a célula atual: ou nasce, ou mantém-se viva ou morre.

Neste capítulo é explicado o modelo conceitual de um autômato celular para o comportamento das tubulinas no microtúbulo neural. São detalhadas as estruturas do modelo assim como o seu comportamento.

#### 4.1 Definição do autômato celular de Rasmussen

Em 1992 (portanto anterior ao modelo ORCH OR) foi publicado um trabalho conjunto entre cinco cientistas, entre eles Steen Rasmussen e Hameroff (STEEN, 1992). Neste trabalho, os autores enumeram as seguintes motivações para a modelagem computacional do comportamento das tubulinas:

- A computação moderna está evoluindo em direção a estruturas menores, mais rápidas e arquiteturas paralelas e adaptativas. A manipulação de dados por meio de alterações de conformação de proteínas ocorre em um ambiente que pode oferecer pequenas estruturas (da escala de nanômetros), estados com alta velocidade de transição (nano segundos), automontagem, transições de fase e reestruturação adaptativa.
- As desvantagens de computadores baseados em proteínas incluem a dificuldade de

concepção de uma interface, a dependência sensível à 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.”

A modelagem apresentada nesse artigo define cada tubulina como uma célula num modelo de autômato celular e trabalha com medidas de força de atração, chamada FNet (ver Tabela 4.1), entre as tubulinas vizinhas. A força de atração é a componente necessária para as mudanças de conformação do dímero central das tubulinas. O dímero central representa a própria tubulina constituindo cada célula do autômato.

Conforme a força exercida pela vizinhança, uma tubulina pode sofrer mudança conformacional do estado 0 para o estado 1, ou vice-versa. Esta 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 (HAMEROFF, 1996).

#### 4.1.1 Conformação das Tubulinas

No modelo de Rasmussen, a orientação da polaridade das tubulinas possui influência direta na transmissão do sinal sináptico internamente ao neurônio. Durante a transmissão de um sinal sináptico, as tubulinas vão se arranjando conforme a carga elétrica transita pela parede do microtúbulo, porém, com a mudança de orientação das tubulinas, pode haver uma interrupção do sinal se as cargas se anularem durante o trajeto. Toda a mudança de orientação das tubulinas durante o trajeto do sinal sináptico é feito de acordo com uma força eletrostática gerada pelas tubulinas vizinhas (seis) que podem alterar ou não o estado do dímero continuamente. Todas as tubulinas da parede do microtúbulo estão em constante processo de rearranjo para o trânsito dos sinais sinápticos através da rede de microtúbulos do citoesqueleto neural.

#### 4.1.2 A força FNet

A FNet é uma força eletromagnética sofrida por uma tubulina de acordo com a orientação das suas tubulinas vizinhas. Como a tubulina é um dímero polar, formado por uma proteína positiva e outra proteína negativa ( $\alpha - Tubulina$  e  $\beta - Tubulina$ ), as

cargas dos pólos de suas vizinhas acaba por formar uma força de atração podendo ou não deslocar a orientação da tubulina, conforme explica Rasmussen (STEEN, 1992). A FNet (em  $10^{-14}N$ ) foi calculada por Rasmussen e possui os valores na Tabela 4.1.2.

Tabela 4.1 – Força eletromagnética das tubulinas vizinhas

Posição do Vizinho	Dímero central em $\alpha$ vizinho em $\alpha$	vizinho em $\beta$	Dímero central em $\beta$ vizinho em $\alpha$	vizinho em $\beta$
N	+15.625	+62.500	+6.944	+15.625
NE	+15.205	-7.022	+9.635	+15.205
SE	-14.250	-8.338	-7.022	-14.250
S	-15.625	-6.944	-62.500	-15.625
SW	-15.205	-9.635	+7.022	-15.205
NW	+14.250	+7.022	+8.338	+14.250

No cálculo da FNet, leva-se em consideração que a tubulina pode estar em dois estados clássicos (0 e 1) , e que existem 6 tubulinas vizinhas à ela podendo assumir também, cada uma, dois valores possíveis.

A FNet total de uma tubulina é calculada a partir da soma da força exercida por cada um dos seis vizinhos, ou seja:

$$\sum_{i=N}^{NW} FNet_i = FNet \quad (4.1)$$

Como exemplo, vamos calcular a FNet de uma tubulina em estado  $\alpha$ , com a vizinhança de seis tubulinas (Norte  $N$  até Noroeste  $NW$  respectivamente):  $\alpha, \beta, \beta, \alpha, \beta, \beta$ .

Calculando a FNet a partir da Tabela 4.1.2 temos: +15.625, -7.022, -8.338, -15.625, -9.635, +7.022. A resultante desta combinação de dímero com vizinhança nos dá uma FNet de -17,973.

De acordo com a FNet (total) a conformação da tubulina é alterada, ou não, na parede do microtúbulo.

Esta decisão de alteração de conformação é regida pelas regras de transição, descritas a seguir.

### 4.1.3 Regras de Transição da Tubulinas

A transição de uma tubulina pode ser entendida como a mudança de sua conformação (estado de polarização do dímero) de acordo com sua interação com a vizinhança durante um intervalo de tempo. O processamento do microtúbulo pode ser dividido em dois tempos distintos: aquisição de dados dos vizinhos e computação com ajuste do estado da tubulina. A tubulina no modelo clássico de Rasmussen possui um estado que pode ser expresso pela ação de massas das tubulinas vizinhas que influenciam na alteração do valor de seu estado, a FNet.

A aquisição de dados então é o processo de medir qual é o estado das tubulinas vizinhas de forma a conhecer a força total exercida sobre seu estado.

Transição	Força FNet	Interpretação
$ 0\rangle \rightarrow  1\rangle$	$9 \times 2,3 \times 10^{-14} \text{Newton}$	Transição clássica
$ 1\rangle \rightarrow  0\rangle$	$-9 \times 2,3 \times 10^{-14} \text{Newton}$	Transição clássica

Tabela 4.2 – Tabela das forças de transição clássica

A computação com ajuste do estado da tubulina é uma decisão que leva em consideração a força exercida pela vizinhança e a reação a exercer. De acordo com a força eletroestática exercida pela vizinhança ocorre o deslocamento das tubulinas no eixo N-S, como é mostrado na Tabela 4.2, onde para ocorrer uma mudança de estado  $|0\rangle$  para  $|1\rangle$  a FNet necessária é de  $9 \times 2,3 \times 10^{-14} \text{Newton}$ .

Para uma mudança de conformação  $|1\rangle$  para  $|0\rangle$  a FNet deve ser menor que  $-9 \times 2,3 \times 10^{-14} \text{Newton}$ . Qualquer valor de FNet neste intervalo não modifica a conformação da tubulina (STEEN, 1992).

A evolução temporal do autômato é feita pela sucessiva leitura da FNet e consequente aplicação da regra da Tabela 4.2.

O cálculo de toda a matriz precisa ser feito com os valores de estado absoluto das tubulinas (chamado tubulin), sendo que os valores de estado intermediários (chamado tubulin') são persistidos somente após a varredura de todas as células do autômato para garantia da consistência dos estados durante a evolução temporal (gerações).



## 4.2 Sumário

Esse capítulo descreveu o modelo computacional de autômatos celulares. O autômato celular é composto de uma matriz de células, células estas que possuem um estado e o estado é alterado conforme regras, que geralmente se relacionam com o estado das células vizinhas.

A partir disto, descreveu-se como Rasmussen (STEEN, 1992) desenvolveu a descrição do comportamento das tubulinas na parede do microtúbulo neural utilizando autômatos celulares. O autômato celular de Rasmussen nomeia a tubulina como célula, a matriz é o próprio microtúbulo mapeado em duas dimensões enquanto a vizinhança da célula possui seis vizinhos. A célula portanto tem o formato hexagonal. As regras de mudança de estado da célula (o estado corresponde à conformação da tubulina) são dependentes da força de atração eletromagnética das tubulinas vizinhas e seu arranjo dinâmico define o comportamento do microtúbulo.

O detalhe importante do trabalho de Rasmussen é que sua modelagem não descreve comportamento quântico nas tubulinas (seu trabalho é anterior ao artigo da teoria de Hameroff e Penrose).

## 5. Modelagem Funcional de Orch OR

Um dos pilares deste trabalho é a modelagem da teoria biológico quântica Orch OR, de maneira a compreendê-la e tornar possível fazer sua simulação. Este capítulo apresenta a modelagem em autômato celular da teoria Orch OR, identificando seus componentes.

### 5.1 A linguagem Haskell

Haskell é uma linguagem de funcional de propósito geral. Um programa em linguagem funcional basicamente é um conjunto de definições de funções. Toda e qualquer expressão em Haskell é avaliada como uma expressão matemática, então o interpretador irá reduzir a expressão ao máximo até encontrar seu valor por meio de leis algébricas. Existem vários compiladores disponíveis livremente para diferentes plataformas.

A linguagem Haskell é baseada no *paradigma funcional*, que consiste na escolha de funções matemáticas que expressem o problema a ser resolvido de forma declarativa, formalizando a sua funcionalidade em funções matemáticas. Programar em linguagem funcional consiste basicamente definir funções matemáticas que resolvam um problema e fazer o computador solucionar estas funções ou expressões.

Foi escolhida a linguagem Haskell para a implementação deste simulador pela proximidade do código fonte com a sintaxe da modelagem matemática e comportamental definida na fase de modelagem da teoria. O código fonte se torna mais fluente nas definições descritas anteriormente que uma programação orientada à objetos, por exemplo.

### 5.2 Autômato Celular em Haskell

Como já foi explicado anteriormente, um autômato celular é uma matriz de células interagindo entre si por regras conforme o comportamento de sua vizinhança. O primeiro passo para a implementação é a definição das funções do modelo Orch OR. Em um autômato, trabalhamos com células e uma matriz.

A sintaxe da linguagem Haskell nos permite definir tipos de dados abstratos, utilizando o seguinte formato:

*type Identificador*

Neste contexto, definimos as células, como a coordenada (dois valores inteiros *Int*) na qual ela aparece no microtúbulo (outro dado modelado como uma coleção de células).

Também é definido o tamanho da célula como um número inteiro. \*

```
type Posicao = (Int,Int)
type Microtubulo = (Posicao, [Posicao])
tamCelula :: Int
tamCelula = 61
```

O tamanho da célula indica o tamanho do intervalo de desenho das estruturas no simulador. Todas as células são definidas como coordenadas (linha e coluna) de sua posição na matriz que representa o microtúbulo. Para cada posição, existem 3 estados possíveis que uma célula pode assumir nesta implementação: 0, 1 ou sobreposição, conforme explicado na Seção 3.6. A abordagem para armazenar esta informação sobre o estado das células é a seguinte: cada um dos estados possui uma lista, contendo as células (suas coordenadas), de maneira que uma célula em determinado instante esteja obrigatoriamente em uma das listas.

Então é fundamental a implementação de funções para descobrir se uma célula está em cada uma das listas:

```
estaEmAlpha :: Posicao -> [Posicao] -> Bool
estaEmAlpha celula [] = False
estaEmAlpha celula (h:rest) = if celula == h
                                then True
                                else estaEmAlpha celula rest
```

Onde é percorrida toda a lista (tanto alpha, beta ou a lista sobreposicao) até encontrar a célula, se ela não estiver na lista, então é retornado falso.

A abordagem de implementação das listas para armazenar as células é a necessaria para o tratamento da sobreposição, pois todas as células devem obedecer o colapso ao mesmo tempo, o que será explicado mais adiante no texto.

Existe a necessidade de teste onde todas as células são contadas e conferidos os tamanhos das três listas, garantindo que nenhuma célula foi perdida quando mudando seu estado. A função de teste chama-se *validaTam*:

---

\*Aconselha-se a leitura do curso de Haskell escrito por (Sá, 2006) para a compreensão dos trechos de código-fonte descritos neste capítulo

```
validaTam :: Microtubulo -> Bool
```

Se o número de células for diferente da soma do tamanho das 3 listas, então a simulação é abortada.

### 5.3 Tubulinas do modelo Orch OR como células em um autômato celular

Um autômato celular para modelar o funcionamento dos microtúbulos quânticos de Hameroff e Penrose deve obedecer aos seguintes regulamentos:

- Células: As células devem representar os dímeros de tubulina que compõe a parede do microtúbulo. Estes dímeros possuem livre movimentação e de acordo com sua orientação (por possuírem polaridade) eles são representados por  $|0\rangle$  (quando a tubulina alfa está orientada para cima),  $|1\rangle$  (quando a tubulina beta está orientada para cima) e  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  (representando a sobreposição dos estados com suas respectivas amplitudes). O autômato celular quântico precisa que sua unidade básica, a célula, armazene além dos valores clássicos (o que ocorre no modelo de Rasmussen) também faça o tratamento de dados quânticos. Nesta implementação, a sobreposição que representa o valor quântico no modelo ORCH OR é aquele onde  $\alpha$  e  $\beta$  não podem ser iguais à zero.

A representação dos estados da célula seguirá a seguinte convenção (Figura 5.1):

$1|0\rangle + 0|1\rangle = 0$  = tubulina alfa do dímero para cima.

$0|0\rangle + 1|1\rangle = 1$  = tubulina beta do dímero para cima.

$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = 2$  = sobreposição de estados.

O desenho (*createPolygon*) de cada célula é portanto um hexágono com a vizinhança de acordo com 5.2 desenhado da matriz representada pela Figura 5.3 com o preenchimento feito por *drawRegion*:

```
drawMicrotubule :: Position -> Graphic
drawMicrotubule (x, y) = drawRegion ( createPolygon ([
    ((x*cellSize+1)+(cellSize `div` 3)), y*cellSize+1),
    ((x*cellSize+1)+(2*cellSize `div` 3)), y*cellSize+1),
    ((x+1)*cellSize, (y*cellSize+1)+cellSize `div` 2)),
    ((x*cellSize+1)+(2*cellSize `div` 3)) , (y+1)*cellSize+1),
    ((x*cellSize+1)+(cellSize `div` 3)), (y+1)*cellSize+1),
```

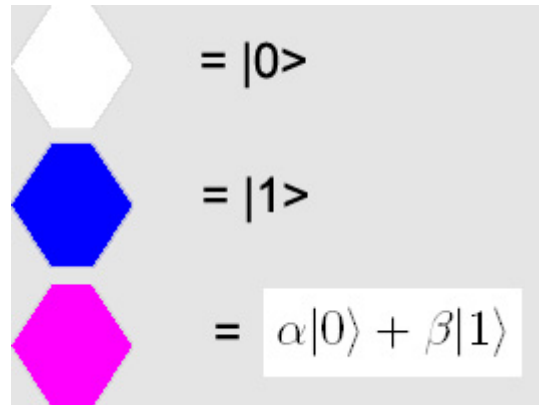


Figura 5.1 – Padrão de representação para a conformação das células no simulador

```
(x*cellSize+1,(y*cellSize+1)+cellSize 'div' (2) )]
```

onde  $x$  e  $y$  são as coordenadas da célula, vindas a partir de seu identificador Posicao.

- **Vizinhança** - a vizinhança de uma célula do autômato celular Orch OR é composta de seis outras células, sendo, portanto uma célula representada por um formato hexagonal (Figura 5.2). As células são dispostas em uma matriz e a primeira linha (e também a última) possuem células com apenas quatro vizinhos. As células das laterais da matriz (primeira e última coluna) são ligadas (matrix reflexiva) para representar corretamente o tubo de uma maneira bidimensional.
- **Estado** - diferente de um autômato celular convencional, onde os estados são discretos, o autômato celular que descreve o modelo Orch OR precisa ter infinitos estados para poder representar todas as amplitudes possíveis em  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  (note que quando um estado está valorado em  $|0\rangle$ , isto significa que  $\beta = 0$  enquanto no momento que o estado está valorado em  $|1\rangle$  o valor de  $\alpha$  vale zero).
- **Regras de Transição**: as transições entre os estados das células obedecem a dois princípios: um clássico o qual é influenciado pelas cargas eletrostáticas das células vizinhas (devido à sua polaridade) e outro quântico. No estado quântico a sobreposição de estados ocorre quando a carga eletrostática não é suficiente para mudar uma célula para outro estado clássico (então o estado fica sobreposto) e o colapso do estado sobreposto é regido por uma atração (a gravidade quântica do modelo Orch OR) entre o conjunto de dímeros sobrepostos.

- Inicialização, Entradas e saídas: um microtúbulo pode ter três tipos diferentes de momentos dipolos: ferroelétrico, paraelétrico e spin-glass (cristalino). Um momento dipolo ferroelétrico garante ao microtúbulo todos seus dímeros de tubulina com a mesma polaridade, ou seja, todas as tubulinas possuem a mesma orientação eletromagnética. No momento dipolo paraelétrica existe uma desorientação total dos dímeros enquanto no momento dipolo spin-glass ocorre a formação de "pedaços orientados" dentro do intervalo de comprimento do microtúbulo.

No momento da inicialização do simulador de microtúbulo, pode-se selecionar o tipo de momento dipolo do mesmo, sendo o default a inicialização ferroelétrica (FABER, 2005). A inicialização paraelétrica necessita de um algoritmo para inicialização, onde são verificados os estados das células vizinhas e feita a escolha de uma orientação do dímero (estado) totalmente diferente entre toda a orientação da vizinhança enquanto na inicialização spin-glass basta que os estados dos dímeros sejam atribuídos aleatoriamente (randomicamente).

A inicialização ferroelétrica é simplesmente iniciar o código com todas as células em uma lista (que será a lista com os estados  $\alpha$ ).

#### 5.4 Vizinhança da Tubulina

Como citado anteriormente, uma tubulina possui seis vizinhos (exceto nos casos de estar nas bordas do tubo) e conhecer quais são suas vizinhas é crucial para o cálculo do comportamento que o dímero irá ter para ajustar seu próprio estado em um passo seguinte na computação dos sinais sinápticos. As posições das células em relação ao dímero central (a tubulina atual) são nomeadas por Rasmussen (STEEN, 1992) como pontos cardeais (N, NE, NW, S, SE, SW)<sup>†</sup>. Como as tubulinas formam um tubo, aquelas que são vizinhas lateralmente (NE, NW, SE e SW) sempre existirão, porém, nas bordas, uma tubulina pode não possuir vizinho em seu norte (N) ou sul (S). Considerando como base do modelo a alfa tubulina ( $\alpha$ -tubulina) como valor positivo e beta tubulina ( $\beta$ -tubulina) como valor negativo e o dímero alfa-beta como simplesmente tubulina. Quando  $\alpha$ -tubulina possuir orientação para cima o estado do dímero será zero. Quando

---

<sup>†</sup>Os pontos cardeais estão em inglês para respeitar o artigo original de Rasmussen, traduzidos, são respectivamente Norte, Nordeste, Noroeste, Sul, Sudeste e Sudoeste.

$\beta$ -tubulina possuir a orientação para cima então o dímero irá assumir valor um.

As tubulinas possuem uma livre movimentação na parede do microtúbulo garantidas pela conformação através da proteína Tau [Bunker Janis], pelo estado gel do citoplasma neural que isola o microtúbulo em determinados momentos (HAMEROFF, 1996) e por moléculas de água no interior do cilindro garantindo o momento dipolo ao longo do microtúbulo.

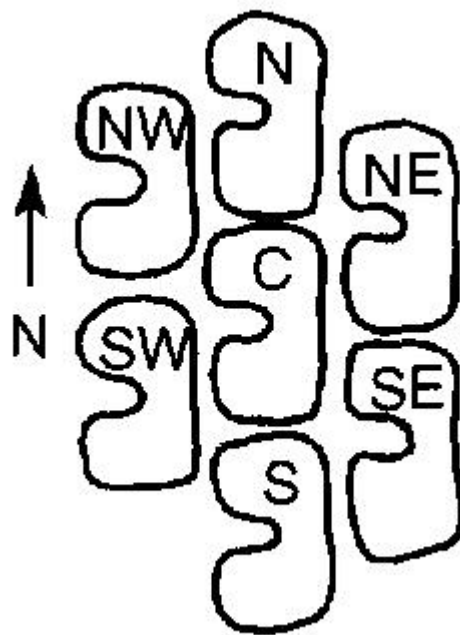


Figura 5.2 – Representação da Tubulina por Rasmussen

Representando a tubulina na Figura 5.2, então cada um dos quadrantes de um hexágono (a até f) representa as direções das tubulinas vizinhas ao dímero. Quando a tubulina possui valor  $|0\rangle$ , então os quadrantes a, b e c emitem valor de atração eletromagnética positiva enquanto d, e e f emitem valor eletromagnético negativo. Quando a tubulina possuir valor  $|1\rangle$  então os quadrantes invertem seus sinais (vizinhanças positivas se tornam negativas e vizinhanças negativas em positivas). Finalmente quando a tubulina está em sobreposição, ela não emite às tubulinas vizinhas nenhuma atração eletromagnética, pois não há determinação da carga dos pólos do dímero no instante da sobreposição.



Figura 5.3 – Matriz de Tubulinas

A representação matricial das tubulinas (Figura 5.3), considerando a variação das linhas  $n$  variando de 1 até  $u$  e a variação das colunas  $m$  de 1 até  $v$ , nos permite mapear os seus vizinhos da seguinte forma:

- Tubulinas nas bordas superiores não possuem vizinhos nas arestas  $a$  e  $b$ .
- Tubulinas nas bordas inferiores não possuem vizinhos nas arestas  $e$  e  $d$ .
- Tubulinas nas bordas esquerdas possuem as arestas  $a$ ,  $f$  e  $e$  ligadas respectivamente às arestas  $d$ ,  $c$  e  $b$  das tubulinas das bordas direitas da matriz.

Seguindo esta representação, todos os elementos  $a_{nm}$  podem ter suas vizinhanças definidas em:

Onde  $a$  é o elemento,  $l$  é a linha,  $c$  coluna e entre as chaves o lado do dímero que se relaciona com o dímero central.

Como exemplo vamos calcular a vizinhança do elemento  $a_{43} \mapsto$

lado  $a$  -  $l: 4 - 1 = 3$ ;  $c = 3$ ;  $a_{33}$  lado  $d$

lado  $b$  -  $l: 4 - 1 = 3$ ;  $c: 3 + 1 = 4$ ;  $a_{34}$  lado  $e$

lado  $c$  -  $l: 4 + 1 = 5$ ;  $c: 3 + 1 = 4$ ;  $a_{54}$  lado  $f$



Lado	Vizinho
a	$a_{l-1,c}\{d\}$
b	$a_{l-1,c+1}\{e\}$
c	$a_{l+1,c+1}\{f\}$
d	$a_{l+1,c}\{a\}$
e	$a_{l+1,c-1}\{b\}$
f	$a_{l-1,c-1}\{c\}$

Tabela 5.1 – Método de cálculo da vizinhanca da Tubulina

lado d - l:  $4 + 1 = 5$ ; c = 3;  $a_{53}$  lado a

lado e - l:  $4 + 1 = 5$ ; c:  $3 - 1 = 2$ ;  $a_{52}$  lado b

lado f - l:  $4 - 1 = 3$ ; c:  $3 - 1 = 2$ ;  $a_{32}$  lado c

Para o cálculo da vizinhança é definida a seguinte função:

```
calculaViz :: Celula -> [Celula]
```

Onde a lista com as células vizinhas é ordenada de a até f com os valores de seus estados indicados conforme a notação explicada anteriormente.

## 5.5 Regras de Transição de estados no autômato celular Orch OR

As regras para a transição seguem descritas na Tabela 5.2, que é uma extensão das transições nomeadas por Rasmussen que as modela utilizando células com dois estados (tabela 4.2), não podendo assim simular o comportamento quântico teorizado por Hameroff. Na Tabela 5.2, o valor da força eletrostática para um estado clássico (0 e 1) entrar em sobreposição é uma medida intermediária daqueles valores para transições clássicas ( $0 \rightarrow 1$  e  $1 \rightarrow 0$ ).

O cálculo desta força é feita através da força eletrostática descrita por Rasmussen, a  $F_{net}$ .

Existe uma função para o cálculo desta  $F_{net}$ , recebendo como parâmetro a lista de vizinhança de uma célula e retornando o valor  $F_{net}$  resultante.

```
calcFnet :: [Celula] -> Double
```

Transição	Força Fnet	Interpretação
$ 0\rangle \rightarrow  1\rangle$	$9 \times 2,3 \times 10^{-14} \text{Newton}$	Transição clássica
$ 0\rangle \rightarrow \alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$	$4,5 \times 2,3 \times 10^{-14} \text{Newton}$	Sobreposição de estados
$ 1\rangle \rightarrow  0\rangle$	$-9 \times 2,3 \times 10^{-14} \text{Newton}$	Transição clássica
$ 1\rangle \rightarrow \alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$	$-4,5 \times 2,3 \times 10^{-14} \text{Newton}$	Sobreposição de estados
$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle \rightarrow  0\rangle$	Gravidade quântica	Auto-colapso
$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle \rightarrow  1\rangle$	Gravidade quântica	Auto-colapso

Tabela 5.2 – Tabela das forças de transição clássica e transição quântica

Este número retornado será utilizado para a definição de qual comportamento a célula vai ter conforme sua vizinhança. Conforme a Tabela 5.2 nas quatro primeiras linhas, de acordo com a Fnet a célula é inserida em uma das três listas representantes dos estados das tubulinas simuladas, ou a lista *alpha*, *beta*, ou *sobreposicao*.

Esta abordagem de produção de estados emaranhados difere daquela explicada por Sabry (SABRY, 2003) pois todas as células em sobreposição atuam como um único conjunto emaranhado. Então este grupo de células é agrupado em uma mesma lista.

```

if isAlpha celula
  then if calcFnet celula > limiteSup
    then do
      sobreposicao:celula
      remove isAlpha

```

Onde o código acima também se repete para a célula no caso de ela estar na lista beta, mudando o teste do segundo *if* para “< limiteInf”. O limite inferior e o limite superior são os valores de Fnet  $-4,5 \times 2,3 \times 10^{-14} \text{Newton}$  e  $4,5 \times 2,3 \times 10^{-14} \text{Newton}$  respectivamente.

## 5.6 Colapso de Onda

Até o momento foram definidas algumas características do modelo quântico de Hameroff e Penrose (ORCH OR) que podem ser simuladas em um autômato celular. Foi mostrada como é constituída a subunidade do microtúbulo dos neurônios (a tubulina), sua polaridade e a capacidade de livre movimentação de seus pólos cuja orientação determina o sentido dos elétrons durante todo o trajeto intracelular. Também foi

descrito como identificar a vizinhança de uma tubulina dentro da representação matricial de um autômato. O cálculo da FNET e seus valores para colocar as tubulinas ou em outro estado clássico (sofrer uma transição clássica) ou colocar a tubulina em um estado de sobreposição (sofrer uma transição quântica) também foram explicados, resta explicar como o autômato celular irá calcular o momento de entrar em colapso quando em sobreposição. É preciso definir a maneira como é feito o colapso das tubulinas em sobreposição porque em um sistema quântico padrão, na ausência de interferência ambiental, um sistema sobreposto manterá a sua sobreposição indefinidamente. No modelo OR, as superposições macroscópicas são consideradas como instáveis mesmo sem interferência ambiental. Por isso o estado  $w|0\rangle + z|1\rangle$  irá sofrer colapso, em um determinado período de tempo, quer para o estado clássico  $|0\rangle$  ou  $|1\rangle$ , com relativas probabilidades  $|w|^2$  e  $|z|^2$ . O colapso no modelo OR diz-se que é uma transição entre um evento pré-consciente e um evento consciente. A formação da consciência (ou a formação dos caminhos que os impulsos nervosos que formam a consciência) está no colapso da sobreposição dos dímeros formadores dos microtúbulos. Segundo ainda Hameroff (HAMEROFF, 1996): “A extensão da superposição no espaço-tempo causando auto-colapso está relacionada com a gravidade quântica, e igual a de uma ‘unidade absoluta’.” Considerando os dímeros de tubulinas como duplas de esferas de proteínas, são necessárias  $6 \times 10^{13}$  tubulinas em sobreposição durante 500 msec (microssegundos) para criar a gravidade quântica necessária para causar o colapso de tubulinas em sobreposição (autocolapso)(HAMEROFF, 1996). Ainda em seu trabalho, Hameroff e Penrose calculam que se a distribuição de massa das tubulinas for considerada como um núcleo atômico, então são necessárias  $10^9$  tubulinas em 500 msec para causar um autocolapso. Finalmente, se a distribuição de massa das tubulinas for considerada como nucleons, são estimadas  $5 \times 10^9$  tubulinas em sobreposição durante 500 msec para gerar um autocolapso, Orch OR.

```
colapso :: [celulas] -> [celulas]
colapso [] = [] ||
colapso lista do
    celula <- head lista
    x <- getStdRandom(randomR(1,10))
    if x < 5 then
        alpha:celula
    else
        beta:celula
```

## 5.7 Funções identificadas para Orch OR

Componente	Nome Função	Detalhe
interface	orchOR (main)	responsável pela execução
	desenhaBotoes	desenha os dois botões inferiores
microtúbulo	drawMicrotubule	desenha a matriz de células
célula	calculaViz	calcula vizinhança da célula
auxiliar	limInferior	retorna valor inferior Fnet para transição
	limSuperior	retorna valor superior Fnet para transição
	tamCelula	define tamanho da célula para desenhar
	estaEmAlpha	retorna se uma célula está na lista alpha
	estaEmBeta	retorna se uma célula está na lista beta
	estaEmSobreposicao	retorna se uma célula está na lista sobreposicao
	validaTam	valida o nr de cel em alpha, beta e sobreposicao c/total
	calculaFnet	calcula o valor de Fnet para uma célula
	emaranha	insere a célula na lista sobreposicao
	colapso	retira todas as células da lista sobreposicao e randomicamente as distribui nas listas alpha e beta

Tabela 5.3 – Listagem de funções do autômato Orch OR

## 5.8 Sumário

Este capítulo relacionou as componentes de um autômato celular definindo a relação de cada um deles com os objetos da teoria biológico quântica de Hameroff e Penrose, a teoria Orch OR. São modelados os microtúbulos, as tubulinas, explicada a vizinhança das tubulinas, as regras de mudança de conformação (as regras para a evolução temporal do autômato), o mecanismo de sobreposição e de colapso de estado quântico neste autômato. Entendido este capítulo, pode-se iniciar a descrição dos cenários de simulação que o trabalho executou como forma de estudar o comportamento das estruturas descritas em (HAMEROFF, 1996).

## 6. Estudo de Caso

Este capítulo tem como objetivo demonstrar como foi procedida a simulação do modelo implementado Orch Or. Depois de ser apresentado neste trabalho conceitos de computação quântica, a teoria quântica Orch OR e sua modelagem, agora será mostrado como foi implementado o comportamento dos microtúbulos e o processamento quântico que a teoria de Hameroff e Penrose diz ser responsável pela formação de consciência no ser humano.

Conforme explicado no capítulo anterior, os eventos que ocorrem no microtúbulo neural podem ser modelados em autômatos celulares. Esta representação computacional fornece um modelo interessante para estudar a evolução temporal dos impulsos elétricos na parede de um microtúbulo. A implementação deste modelo fornece uma ferramenta de simulação capaz de mapear os caminhos de um impulso sináptico, formação de memória através de ondas estacionárias e eventos formadores da consciência (segundo a Orch OR).

### 6.1 Descrição dos Casos

#### 6.1.1 Entrada padrão de sinal sináptico

Toda a primeira linha da matriz de tubulinas recebe valor  $|1\rangle$  simulando uma carga de sinal sináptico.

#### 6.1.2 Verificação de saída de carga na ausência de sinal sináptico

Este caso envolve verificar se a matriz for iniciada com todas as tubulinas em  $|0\rangle$  e após alguns ciclos de vida, haverá saída de dados, ou seja, alguma tubulina na última linha da matriz assumirá valor  $|1\rangle$ .

#### 6.1.3 Observar a ocorrência de planares na matriz de tubulinas

Planares são formas, das mais diversas, que podem ocorrer em um autômato celular. A ocorrência destas formas e a maneira como se deslocam na matriz de tubulinas pode explicar como são transmitidas alterações conformacionais no citoesqueleto neural e como se faz a propagação de informação nos microtúbulos neurais.

#### 6.1.4 Observar a ocorrência de ondas estacionárias

No artigo Orch OR, as ondas estacionárias, ou figuras que se mantêm na matriz de tubulinas, são responsáveis pela “memória” em microtúbulos. A existência destas ocorrências pode fornecer a compreensão do mecanismo de memória na teoria Orch OR.

### 6.2 Modelagem e Simulação dos Casos

O entendimento da simulação deve levar em conta que o autômato celular recebe como sinal de entrada sinais sinápticos (cargas em uma extremidade no sistema de tubulinas polares do microtúbulo). O sinal de entrada na matriz do simulador ocorre na parte superior, o processamento é feito pela mudança de conformação e a saída dos resultados processados é feita na parte inferior da matriz de células (tubulinas).

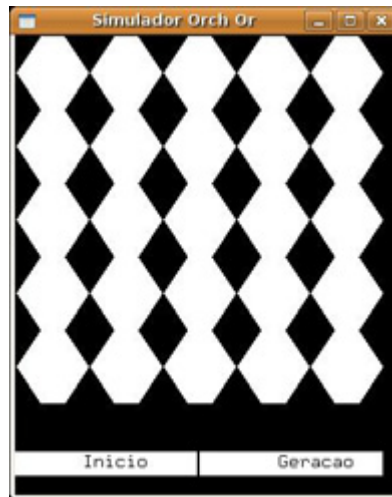


Figura 6.1 – Interface do Simulador

O simulador implementado neste trabalho (Figura 6.1) possui uma matriz representando as tubulinas na parede do microtúbulo. Cada célula (c) representa uma tubulina, explicado no Capítulo 5.3, e sua localização obedece à notação:

- parte superior esquerda:  $c_{00}$
- parte superior direita:  $c_{05}$
- parte inferior esquerda:  $c_{50}$

- parte inferior direita:  $c_{55}$

O mapeamento das tubulinas (e sua vizinhança) obedecem o esquema da Figura 5.3.

Na parte inferior da interface do simulador existem dois botões com o seguinte funcionamento:

**Iniciar** inicia a simulação de modo contínuo. O botão alterna para o *label* "Parar" quando a simulação está ocorrendo.

**Geracao** evolui o sistema de modo passo-a-passo. É possível evoluir uma vez somente clicando neste botão.

### 6.2.1 Sinal Sináptico como entrada do autômato celular

A Figura 6.2 mostra o sinal sináptico evoluindo da geração zero ( $g_0$ ) até a sexta geração ( $g_5$ ) com comportamento de uma onda se propagando nas células do autômato, sem interferência desde que não exista célula com sinal diferente de  $|0\rangle$ .

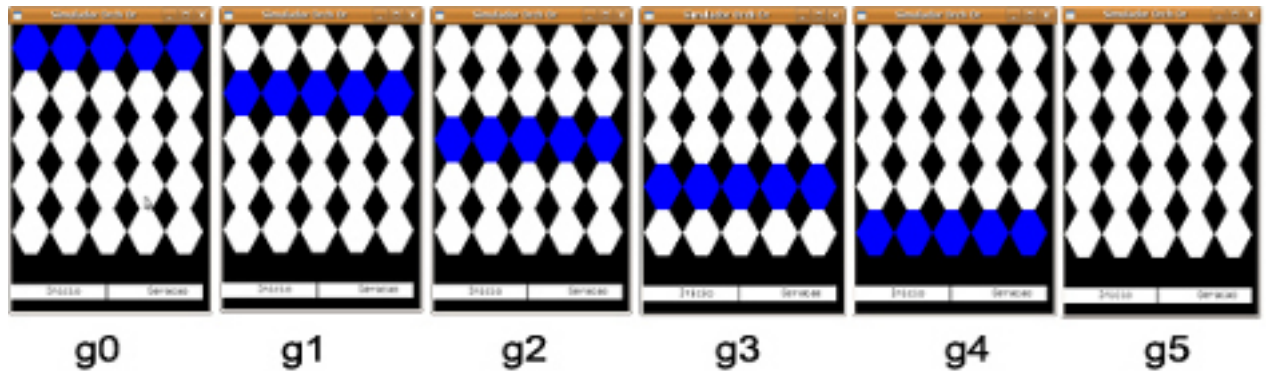


Figura 6.2 – Sinal Sináptico propagando-se no autômato

O resultado deste cenário demonstra que microtúbulos descarregados atuam somente como "redes de transmissão" desde que não estejam em estados diferentes de  $|0\rangle$ .

### 6.2.2 Autômato Celular sem sinal sináptico como entrada

O cenário de simulação deste caso é obtido inicializando a matriz celular que representa o microtúbulo com todas as células em valor  $|0\rangle$ , conforme pode ser visto na Figura 6.3. Interpretando a imagem da esquerda para a direita, existe uma evolução

da geração  $g_0$  para uma geração  $g_n$  que são idênticas e imutáveis através do tempo, pois não existe interferência de cargas no sistema, e portanto, o mesmo se mantém estável.



Figura 6.3 – Evolução do autômato sem sinal de entrada

O resultado da ausência de sinais sinápticos em um autômato Orch OR inicializado totalmente com células em estado  $|0\rangle$  é que não existe processamento (nem produção) de informação no sistema.

### 6.2.3 Planares na matriz de tubulinas

Planares são formas que, durante a evolução temporal do autômato celular, apresentam movimentação na matriz de células. A propagação de planares no autômato celular Orch OR pode indicar padrões de transmissão de informação dentro do citoplasma neural.

O procedimento de simulação de planares no autômato celular Orch OR consiste em inicializar algumas células com estados  $|1\rangle$  enquanto a matriz restante está em estado  $|0\rangle$  e na sequência, é feita a evolução temporal do autômato verificando nas gerações seguintes qual é o comportamento das células (tubulinas).

Um planar já foi visto: a propagação do sinal sináptico, que em uma matriz percorre até atingir a linha  $n$  em  $n$  gerações.

O segundo planar simulado é a variação do sinal sináptico, ao invés de uma linha ser inicializada em  $|1\rangle$ , inicializa-se uma coluna com este estado. A propagação desta linha



através do autômato é homogênea sem gerar alterações na conformação das linhas vizinhas visto que a FNET gerada não é suficiente para uma alteração de estado (clássica ou quântica) das células vizinhas da coluna.

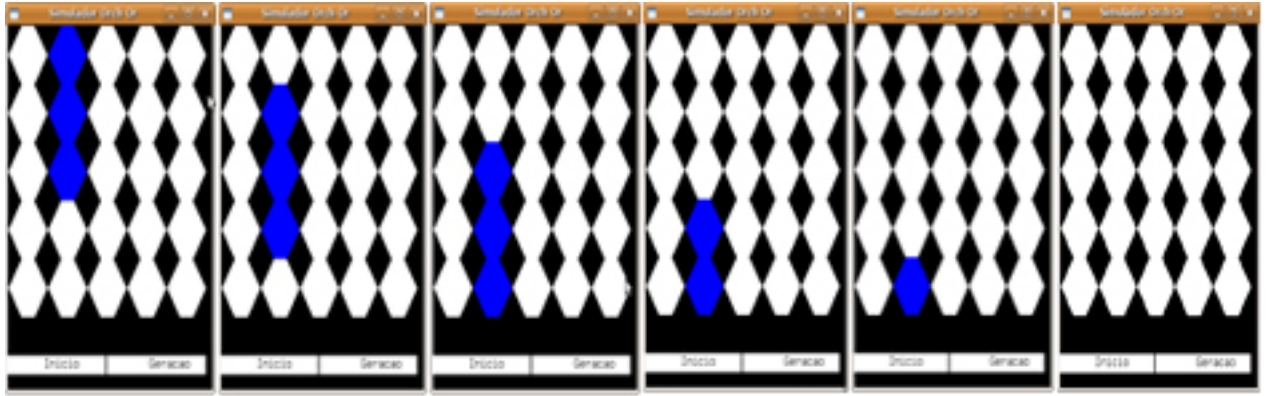


Figura 6.4 – Planar vertical

É possível observar na Figura 6.4 a evolução dos estados no planar vertical. O próximo planar estudado é o formato de "L", e pode ser visto na Figura 6.5.

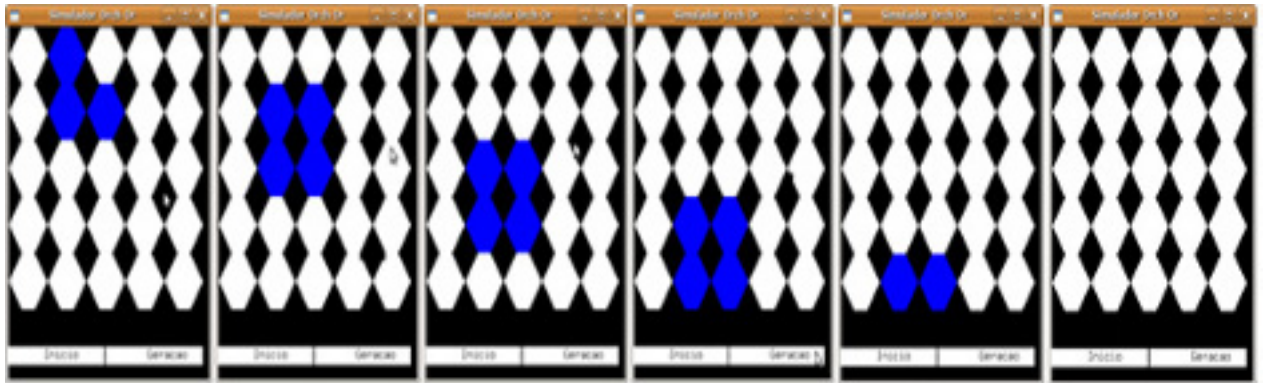


Figura 6.5 – Planar L

Este planar em particular demonstra um comportamento destrutivo, pois já na segunda geração, ele perde sua forma e não a recupera mais durante toda a evolução do sinal na matriz celular Orch OR. Portanto, algumas formas de informação neste autômato acabam sendo alteradas de acordo com seu formato de representação na matriz de tubulinas.

Comportamento diferente possui o planar ilustrado na Figura 6.6 que durante toda a

evolução do autômato celular Orch OR, mantém seu formato.

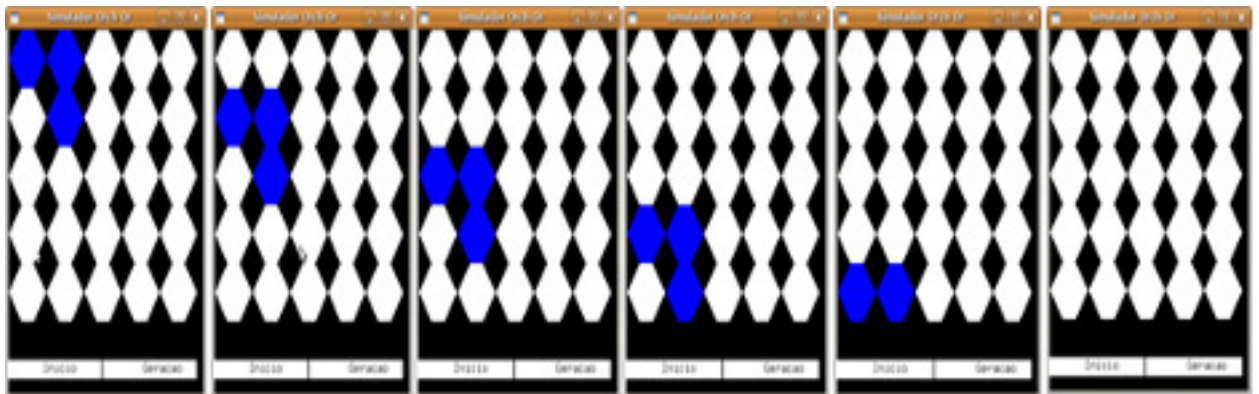


Figura 6.6 – Planar imutável

Este comportamento imutável de certos formatos de planar fornece um embasamento para o entendimento que determinados tipos de impulsos podem transitar por toda uma rede de microtúbulos sem alterar seu formato, podendo este formato também ser um tipo de informação além daquela armazenada no estado da célula do autômato.

Finalmente é feita a simulação de um planar chocando-se com uma célula em estado  $|1\rangle$ , conforme a Figura 6.7.

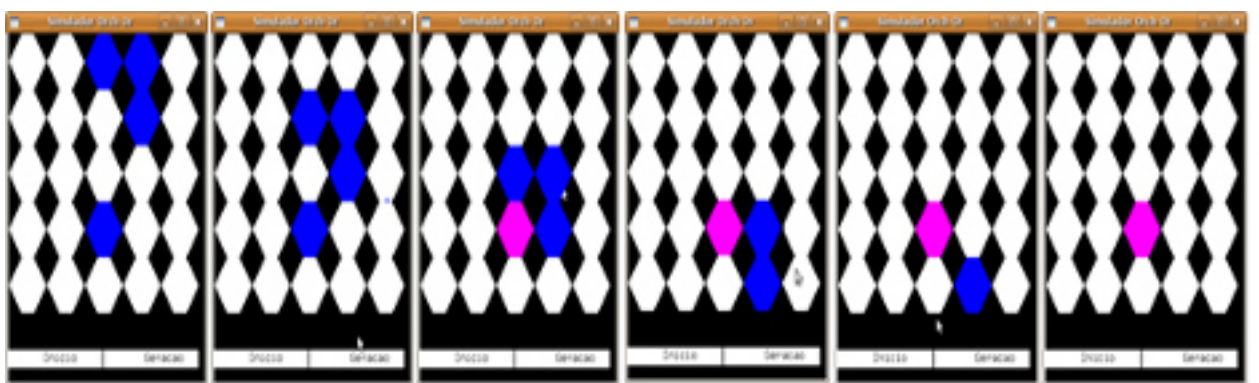


Figura 6.7 – Planar encontrando célula polarizada

O comportamento do planar, apesar de ter o formato imutável descrito no caso anterior, ao encontrar uma célula com polarização  $|1\rangle$  é de mudar seu formato e não recuperá-lo mais, ocorrendo uma perda de informação (no caso, informação da forma).

Além disso, o encontro entre o planar e a célula polarizada a coloca em estado quântico (neste caso particular). Nesta simulação, a célula com estado resultante permanece em estado quântico enquanto o planar deixa a área mapeada pela matriz do autômato celular Orch OR.

A célula irá sofrer colapso em um momento conforme a regra Orch OR e caso tenha valor clássico  $|1\rangle$ , então irá propagar um sinal de saída após  $N$  gerações, conforme sua distância em linhas até o final da matriz. Neste caso, ocorre o processo descrito por Hameroff e Penrose onde após o colapso de um estado quântico há a formação de informação em nível intracelular, ou seja, a transmissão clássica de sinal sináptico.

Neste caso em particular, ocorre a formação da consciência no modelo Orch OR.

### 6.3 Resultados obtidos

Os resultados obtidos com a simulação do modelo Orch OR estiveram, na maioria dos casos, dentro da previsão inicial, sendo que esta implementação aborda uma modelagem bem descrita por Rasmussen em seu modelo clássico. A expectativa quanto ao funcionamento dos elementos do autômato celular Orch OR, quando não confrontado seu comportamento quântico, entra em concordância com aqueles resultados obtidos por Rasmussen. Este cenário já comprovado demonstra que a expansão do modelo clássico para o quântico não ocasionou alteração no funcionamento do autômato celular. Os três casos onde somente é feita a leitura clássica dos estados das células está de acordo com o modelo de Rasmussen.

O caso onde existe informação quântica, a simulação comprova o modelo Orch OR de maneira simplificada. A resposta positiva para a sobreposição da célula define que o modelo, ao menos em teoria, é funcional e pode servir de base para uma eventual implementação física de um computador quântico, tornando-se o modelo Orch OR uma perspectiva para a computação quântica, junto aos demais caminhos científicos que a tecnologia atual estuda (ALVES, 2003).

A implementação do comportamento quântico é feita a partir da inclusão das células em três listas: a lista das células em estado  $|0\rangle$ , a lista das células em estado  $|1\rangle$  e a lista com as células em estado sobreposto. Esta última lista é única para todas as ocorrências de sobreposição e quando existe o colapso, todas as células são convertidas (inseridas em uma das listas clássicas) por meio de um número randômico.

Uma abordagem mais elegante para este modelo seria implementar o autômato utilizando QHaskell (VIZZOTTO, 2006), pois colocaria os estados das células realmente em uma informação quântica e não apenas representaria a célula como em estado quântico.

#### 6.4 Sumário

Neste capítulo, foram descritos quatro diferentes situações de simulação para comprovar o funcionamento e estudar o comportamento do simulador da teoria quântica Orch OR, defendida por Hameroff e Penrose. Após um criterioso estudo do artigo original da teoria (HAMEROFF, 1996) foram definidas como interessantes as seguintes características a estudar: propagação do sinal sináptico no autômato celular, validação da ausência de formação de sinais na parede do microtúbulo quando não existindo sinal sináptico como entrada, memorização de sinais na parede do microtúbulo e finalmente, ocorrência de propagação de estímulos sob forma de formas conformacionais na parede do microtúbulo.

Finalmente são demonstrados os resultados esperados na simulação destes quatro cenários e no próximo capítulo é feita a discussão sobre toda a fundamentação teórica e simulação prática envolvidos neste trabalho.

## 7. Conclusão

Após a investigação da teoria Orch OR, concluiu-se em primeiro lugar que o trabalho foi muito oportuno no quesito interdisciplinariedade ao qual se insere o Mestrado em Nanociências do Centro Universitário Franciscano, UNIFRA e da qual esta dissertação é mecanismo de conclusão do curso. Foram abordados itens de biologia, computação, neurociências, física, filosofia e quântica (mecânica e computação). Logo, este trabalho fez investida em diversos campos do conhecimento de forma a unir esforços no sentido de agregar valores dos mais diferentes aspectos e agregar em uma teoria interessante de ser modelada e simulada: a formação da consciência.

Esta dissertação demonstra a importância da modelagem, e da simulação, em sistemas nanométricos onde a interferência humana pode causar alteração nos resultados e portanto, utilizando-se de métodos computacionais, é possível aproximar-se de cenários realísticos e que podem ser objeto de estudos e conclusões.

O conhecimento produzido neste trabalho pode servir de base para outros projetos, detalhando mais cada uma das componentes e seus comportamentos da teoria Orch OR. Um objetivo individual é continuar estudando este modelo, ampliando as características simuladas e agregar técnicas computacionais para tornar mais refinado o estudo dos componentes biológicos envolvidos na formação de consciência segundo (HAMEROFF, 1996).

Este trabalho não tem a pretensão de esgotar o estudo sobre a teoria Orch OR, nem defendê-la ou contestá-la. Esta dissertação teve como objetivo iniciar uma linha de aprendizado sobre modelos computacionais para a caracterização do comportamento de estruturas celulares na teoria Orch OR. Alguns itens não puderam ser totalmente cobertos nesse trabalho pela enorme abrangência de assunto que Orch OR assume: física, química, biologia, matemática, computação, nanotecnologia, filosofia, neurologia, fisiologia entre outros.

Portanto, cabe ressaltar que a iniciativa de simplesmente demonstrar uma teoria faz deste trabalho um instrumento para despertar a curiosidade e questionamentos para muitos outros estudantes envolvidos nestas áreas citadas.

Dos objetivos do trabalho, todos foram satisfeitos, conforme:

- Foi possível modelar a nanomáquina quântica de Hameroff utilizando autômatos

celulares

- Foi atingido o nível de implementação gráfica da simulação que era esperado.
- Os comportamentos do trabalho de Hameroff foram simulados graficamente no modelo desenvolvido neste trabalho.

Portanto, este trabalho obteve os resultados esperados nos objetivos específicos inicialmente propostos para o trabalho de dissertação de mestrado.

## 7.1 Discussões Finais

O estudo do modelo biológico quântico de Stuart Hameroff e Roger Penrose como alternativa para a implementação de um computador quântico em escala nanométrica forneceu algumas considerações para uma futura abordagem biológica para o problema do processamento de informação de maneira quântica. A primeira consideração é a abertura de horizontes para a integração entre a computação e a biologia (neste caso, a ciência que estuda os neurônios: a neurociência). Alguns estudos têm feito ligação entre a necessidade de processamento de informações e a biologia como instrumento de modelo para futuras soluções (HAMEROFF, 2007),(HALFPAP, 2005),(GERS, 2007).

O processo de formação da consciência, por Hameroff e Penrose, é um campo controverso pois alguns cientistas (das mais diversas áreas) são relutantes em admitir que o evento consciente pode ser descrito por comportamentos físicos em estruturas biológicas. Não é objetivo desta dissertação concordar ou discordar desta abordagem e sim demonstrar características do processo consciente.

Para complementar a discussão, futuramente alguns itens podem ser adicionados (ou melhor caracterizados) para a modelagem estudada neste trabalho, itens estes apresentados a seguir.

## 7.2 Trabalhos Futuros

Após estudar, modelar e simular a teoria quântica Orch OR de Penrose e Hameroff, nota-se o quanto o campo da neurociência tem de potencial para ser desbravado computacionalmente. Persistem muitas dúvidas sobre mecanismos da formação da consciência, da memória, da regeneração cerebral, do processamento dos sinais sinápticos,

das doenças relacionadas com a memória entre outros. Especificamente em relação ao presente trabalho, algumas particularidades poderiam ser melhor aprofundadas propiciando maior conhecimento da teoria, detalhamento dos componentes envolvidos na formação da consciência em neurônios e completude dos diversos itens cobertos pela teoria Orch OR que porventura não tenham sido apreciados. A seguir, são listados alguns detalhes os quais seriam interessante em um desenvolvimento futuro.

#### 7.2.1 Determinação dos coeficientes $\alpha$ e $\beta$ em tubulinas sobrepostas

Foi modelado e simulado um esquema onde os coeficientes de sobreposição da tubulina assumem sempre o mesmo valor ( $\sqrt{\frac{1}{2}}$ ). Um trabalho interessante poderia ser a variação dos coeficientes de acordo com a FNET exercida sobre as tubulinas quando estas entram em estado sobreposto. Conforme a diferença de valor na FNET, a orientação da tubulina seria diferente e consequentemente os valores  $\alpha$  e  $\beta$  seriam diferentes.

#### 7.2.2 Consideração das Fnet em espaço tridimensional

Neste estudo, seria considerado os microtúbulos vizinhos como atuantes na Fnet responsável pela mudança de conformação de uma tubulina. A FNET calculada deveria levar em consideração também tubulinas acima daquela já com seis vizinhas, pois um microtúbulo pode estar próximo o suficiente para efetuar atração eletroestática no dímero central, e esta atração pode causar mudança conformacional na tubulina.

#### 7.2.3 Tratamento de estado dentro da estrutura da célula

Uma implementação associando a célula diretamente ao seu estado, e não listando as células com o mesmo estado em listas, como foi feito neste trabalho, poderia ser interessante pois neste caso, os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  poderiam estar associados particularmente na célula, indicando qual sua alteração de orientação em relação ao eixo N-S.

#### 7.2.4 Estudo dos formatos de planares propagando-se no microtúbulo

Um estudo interessante para compreender mais detalhadamente o microtúbulo é listar possíveis formas de planares na matriz celular Orch OR e quais seus comportamentos. Devido ao elevado número de combinações possíveis, neste trabalho não existe a

possibilidade de abrangência de todo o conjunto de formatos de planares possíveis em uma matriz hexagonal. Um estudo futuro poderia determinar quais formatos são mutáveis, quais são imutáveis, quais tipos de movimentação estas formas podem adquirir dentro da dinâmica das tubulinas no modelo Orch OR.

#### 7.2.5 Implementação em QHaskell

A implementação do comportamento das tubulinas em QHaskell (VIZZOTTO, 2006) torna-se interessante quando a informação contida na conformação for considerada tão importante quanto a própria representação da conformação, além do fato de QHaskell ser uma abordagem em desenvolvimento e a conversão desta modelagem poderia se tornar uma *implementação de referência* da linguagem.

#### 7.2.6 Modelagem matemática das funções e evolução temporal do sistema Orch OR

A modelagem matemática em detalhe do comportamento das funções de Orch OR pode fornecer uma série de dados interessantes que não foram possíveis ser determinados nesta implementação. Comparar a abordagem dada ao problema com outros modelos matemáticos conhecidos na literatura para problemas biológicos pode gerar um bom campo de trabalho em uma eventual sequência deste trabalho.

Então a descrição do modelo físico em termos de modelo matemático irá ampliar a fundamentação das versões futuras de simuladores Orch OR.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, E. Teoria quântica da gravitação: Cordas e teoria m. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 1, p. 147–155, 2005. [Www.sbfisica.org.br](http://www.sbfisica.org.br).
- ALVES, F. L. *Computação Quântica: Fundamentos Físicos e Perspectivas*. [S.l.], 2003.
- BENNETT, C.; BRASSARD, G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*. [S.l.: s.n.], 1984.
- BRUCE, A. *Fundamentos da Biologia Celular: Uma Introdução à Biologia Molecular da Célula*. 1. ed. [S.l.]: Artmed, 1999. ISBN: 85-7307-494-9.
- BURNETT, S. *Criptografia e Segurança - O Guia Oficial RSA*. 4. ed. [S.l.]: Campus/Elsevier, 2002.
- CALLAHAN, P. *What is the Game of Life?* 2005. [Http://www.math.com/students/wonders/life/life.html](http://www.math.com/students/wonders/life/life.html). Acessado em Nov 2008.
- CLIFFORD, B.; DAVID, W. Force fluctuations and polymerizations dynamics of intracellular microtubules. v. 104, n. 41, p. 16128–16133, Oct 2007. Pnas. 0703094104.
- DREXLER, E. *Engines of Creation*. 1. ed. [S.l.]: Anchor Books, 1986.
- FABER, J. *Jogos quânticos a partir de hamiltonianos biofísicos e um critério de otimização sub-neuronal da informação*. Tese (Doutorado) — Laboratório Nacional de Computação Científica, <http://www.lncc.br>, outubro 2005.
- FEYNMAN, R. *Lectures on Computation*. 1. ed. [S.l.]: Westview, 1996.
- FOLDOC. *Free On-Line Dictionary of Computing*. 2008. [Http://foldoc.org/foldoc.cgi?query=finite+state+machine](http://foldoc.org/foldoc.cgi?query=finite+state+machine).
- FREEDMAN, D. Quantum consciousness. *Discover Magazine*, p. 89–98, nov 1994.
- GERS, H. G. F. Cam-brain: a new model for atr's cellular automata based artificial brain project. Url: <http://www.hip.atr.co.jp/flx>. 2007.

GRECO, A. Cérebro a maravilhosa máquina de viver: novas descobertas o tornam ainda mais fascinante. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Editora Terceiro Nome, 2006. v. 1. ISBN 8587556622, pg. 28.

HALFPAP, D. M. *Um modelo de consciência para aplicação em artefatos inteligentes*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, <http://www.ufsc.br>, Setembro 2005. Acessado em fev 2008.

HAMEROFF, R. P. S. Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: A model for consciousness? *MIT Press.*, p. 507–540, 1996. In: *Toward a Science of Consciousness - The First Tucson Discussions and Debates*.

HAMEROFF, S. The brain is both neurocomputer and quantum computer. *Cognitive Science*, n. 31, p. 1035–1045, March 2007.

HILL, M. A fast quantum mechanical algorithm for database search. In: *Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC)*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 212–219. ArXiv:quant-ph/9605043v3.

INTEL. *A Lei de Moore ainda é válida?* 2007. <Http://blogs.intel.com/brasildigital/2008/01>. Acessado em agosto de 2008.

INTEL. *Intel Microarchitecture Nehalem*. 2008. <Http://www.intel.com/technology/architecture-silicon/next-gen/index.htm>. Acessado em setembro de 2008.

JÚNIOR, O. P. *Conceitos de Física Quântica*. 2. ed. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2005.

MERMIN, N. D. *Quantum Computer Science, an introduction*. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007. ISBN:978-0-521-87658-2.

NIELSEN, I. S. M. *Computação Quântica e Informação Quântica*. [S.l.]: Bookman, 2005.

PENROSE, R. *Shadows of Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness*. [S.l.]: Oxford University Press, 1996.

PENROSE, R.; GARDNER, M. *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. 1. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 1999.

- RIBEIRO, H. M. Uma revisão da teoria quântica da consciência de penrose e hameroff. *Revista Eletrônica Informação e Cognição*, v. 3, n. 1, p. 108–125, 2001. ISSN:1807-8281.
- Sá, M. F. S. Claudio Cesar de. *Haskell Uma abordagem prática*. 1. ed. [S.l.]: Novatec, 2006. ISBN: 85-7522-095-0.
- SABRY, A. Modelando computação quântica em haskell. In: *Proceedings of the ACM SIGPLAN Workshop on Haskell*. [S.l.: s.n.], 2003. [Http://www.cs.indiana.edu/sabry/research.html](http://www.cs.indiana.edu/sabry/research.html).
- SALMERON, R. Física moderna. E-book: <http://efisica.if.usp.br/moderna/>. 2007.
- SHOR, P. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *IEEE Computer Society Press*, p. 124–134, Nov 1996. ArXiv:quant-ph/9508027 v2 25 jan 96.
- SHOR, P. W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM J.SCI.STATIST.COMPUT.*, v. 26, p. 1484, 1997. Disponível em: <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:quant-ph/9508027>.
- STAMP, A. G.-A. P. Spin-based quantum computers made by chemistry: Hows and whys. *Journal of Materials Chemistry*, Oct 2008. DOI 10.1039/b811778k.
- STEEN, R. Models for molecular computation: Conformational automata in the cytoskeleton. *IEEE Computer*, Nov 1992.
- THOMPSON, S. *Haskell The Craft of Functional Programming*. 2. ed. [S.l.]: Addison-Wesley, 1999. ISBN 0-201-34275-8.
- TOFFOLI, N. M. T. *Cellular Automata Machines*. 1. ed. [S.l.]: MIT Press, 1987.
- VIZZOTTO, J. K. Linguagens de programação quântica: um apanhado geral. In: QUÂNTICA, W. E. de Computação e I. (Ed.). *Anais Weciq*. [S.l.: s.n.], 2006. Mini-curso 5.
- WARNER, W. *Great moments in microprocessor history*. <http://www.ibm.com/developerworks/library/pa-microhist.html>: [s.n.], dec 2004. IBM. Acessado em agosto de 2008.

WIESNER, S. Conjugate coding. *SIGACT News*, ACM, New York, NY, USA, v. 15, n. 1, p. 78–88, 1983. ISSN 0163-5700.

ZEIGLER, B. *Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, 2000.