

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Análise Semiótica de Redes Neuroenergéticas para a Construção de Agentes Inteligentes

Dissertação de Mestrado

Autor: **Daniel Weingaertner**

Orientador: **Prof. Dr. Ricardo Ribeiro Gudwin**

Banca Examinadora: **Prof. Dr. Fernando José Von Zuben**

(DCA-FEEC-UNICAMP)

Prof. Dr. Armando Freitas da Rocha

(DCA-FEEC-UNICAMP)

Prof. Dr. Cairo Lúcio Nascimento Júnior

(IEES-IEE-ITA)

Tese submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, para preenchimento dos pré-requisitos parciais para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas – SP
Fevereiro, 2003

À minha esposa,
linda!

Resumo

Neste trabalho apresentamos as redes neuroenergéticas propostas pelo pesquisador russo Leonid B. Emelyanov-Yaroslavsky, e analisamos o modelo de agente inteligente construído com estas redes, comparando-o com outros modelos existentes na literatura e também avaliando suas capacidades semióticas. As redes neuroenergéticas caracterizam-se por serem auto-organizáveis em torno do objetivo de minimização do consumo de energia de seus neurônios. A partir deste objetivo, e dadas algumas restrições, surgem no agente neuroenergético características típicas de sistemas inteligentes como memória, volição, aprendizado, capacidade de generalização, criatividade, etc. Uma versão computacional da rede neuroenergética foi implementada comprovando sua viabilidade operacional e capacidade de auto-organização. Embora não tenha sido implementado, o agente neuroenergético abre grandes perspectivas no sentido de criar sistemas cognitivos capazes de atuar nos mais diversos ambientes e domínios, como por exemplo no controle de veículos autônomos.

Palavras-chave: inteligência artificial, semiótica, agentes, redes neurais, neuroenergético, auto-organização.

Abstract

In this work we present the neuroenergetic networks proposed by the Russian researcher Leonid B. Emelyanov-Yaroslavsky, and also analyze the model of an intelligent agent constructed with these networks, comparing it with other existing models in literature and evaluating its semiotic capabilities. The neuroenergetic networks are characterized for being auto-organized around the objective of minimization of their neurons energy consumption. From this objective, and given some restrictions, there appear in the neuroenergetic agent some typical characteristics of intelligent systems as memory, volition, learning, capacity of generalization, creativity, etc. A computational version of the neuroenergetic network was implemented, proving its operational viability and capacity of auto-organization. Although it has not been implemented, the neuroenergetic agent opens great perspectives in the direction of creating cognitive systems, capable to act in most diverse environments and domains, as for example in the control of autonomous vehicles.

Keywords: artificial intelligence, semiotic, agents, neural networks, neuroenergetic, auto-organization.

Agradecimentos

Agradecimentos são uma oportunidade de dividir ônus e bônus. Quero dividir especialmente os últimos. Os primeiros já foram divididos, em parcelas, ao longo dos anos.

Agradeço ao meu Deus, querido, pela vida, tão rica; por este mundo, tão surpreendente; e por seu amor, infinito.

À minha esposa, amada, que me completa. Obrigado por dividires a vida comigo. Tantas alegrias que já tivemos, e tantas que nos aguardam. Também as lágrimas compartilhadas, e as que estão por vir. Obrigado por teu carinho...

Aos meus pais, em língua materna: *euer Sohn ist schon Gross, holt sich aber immer noch sein tägliches Brot... und viel mehr, viel viel mehr bekomme ich von euch. Fuer Liebe und Lehre bin ich euch lebenslang Dankbahr.*

Ao Gudwin, por me orientar no trabalho, por abrir as portas da Unicamp, e me apresentar a tantos: Peirce, Edelman, Kant, Franklin, Yaroslavsky (certo, Mário Ernesto, conheceste Yaroslavsky antes), Santaella, e tantos outros que me guiaram nos estudos.

Aos professores do DCA, pelas aulas, pela consultoria e pela dedicação. Especialmente ao Von Zuben, de quem roubei precioso tempo. À CAPES, pelo financiamento dos estudos, e aos colegas do LCA: metade da graça de estudar está em compartilhar as idéias com os colegas, a outra metade está em compartilhar os resultados. Valeu André, por ambos.

Lei da Criação de Deus

Só é apto a confortar
aquele que foi confortado.
Só o amado
ama,
só o perdoado
perdoa,
só quem abrigo encontrou
o desamparado abriga.
Só o agraciado
usa de graça,
só o que foi socorrido
socorre,
só o que bênção obteve,
abençoa.
Só quem recebeu,
dá,
só o reconciliado
reconcilia,
só o cálice
que Deus faz transbordar
o sedento sacia.

(Lindolfo Weingärtner)

Sumário

SUMÁRIO	ix
LISTA DE FIGURAS	xv
NOTAÇÃO	xx
1 Introdução	1
1.1 Prólogo	1
1.1.1 Organização do Capítulo	3
1.2 Motivação	3
1.3 Histórico da Pesquisa	5
1.3.1 Inteligência Artificial Simbólica	5
1.3.2 Inteligência Artificial Conexionista	7
1.3.2.1 Neurônio Artificial	8
1.3.3 Arquiteturas de Agentes Inteligentes	9
1.3.4 Teoria Autopoiética e Paradigma Promulgador	11
1.3.5 Seleção de Grupos Neurais	13
1.4 Estrutura da Tese	15
2 Semiótica Peirceana	17
2.1 Introdução	17
2.1.1 Organização do Capítulo	18

2.2	O que é Semiótica	18
2.3	Categorias Fenomenológicas	19
2.3.1	Primeiridade	21
2.3.2	Secundidade	21
2.3.3	Terceiridade	21
2.4	Signo e Semiose	22
2.4.1	O Início da Semiose	23
2.4.2	O Signo	24
2.4.2.1	O Fundamento do Signo	25
2.4.2.2	O Signo e seu Objeto	26
2.4.3	O Objeto	27
2.4.3.1	Dois tipos de Objetos	28
2.4.3.2	Objeto e Percepção	29
2.4.4	O Interpretante	31
2.4.4.1	As Divisões do Interpretante	33
2.5	Tricotomias do Signo	35
2.5.1	Signo em Si Mesmo	36
2.5.2	Signo em Conexão com seu Objeto	37
2.5.3	Signo como Representação para o Interpretante	38
2.6	Os Três Tipos de Raciocínio	39
2.7	Resumo	42
3	Conceito Neuroenergético de Inteligência	43
3.1	Introdução	43
3.1.1	Organização do Capítulo	44
3.2	Um Modelo para o Agente Neuroenergético	44
3.3	O Neurônio	46
3.4	A Rede Neuroenergética	49

3.4.1	Regimes de Sono e Vigília	50
3.5	Memória e Centro Emocional	51
3.5.1	Formação da Memória	52
3.5.2	Funcionamento da Memória	53
3.5.3	Controle do Agente — Centro Emocional	54
3.6	Regime de Subconsciência	57
3.7	Sistema de Auto-excitação	58
3.8	Resumo	58
4	Rede Neuroenergética	61
4.1	Introdução	61
4.1.1	Organização do Capítulo	62
4.2	Neurônio	62
4.2.1	Degeneração e Regeneração	62
4.2.2	Geração de Impulsos	63
4.2.3	Potencial Resultante	67
4.2.3.1	Limiar Estático	67
4.2.3.2	Limiar Puro	68
4.2.4	Consumo de Energia	70
4.2.5	Conexões Interneuronais e Regra de Treinamento	73
4.2.5.1	Conexões Excitatórias	74
4.2.5.2	Conexões Inibitórias	75
4.2.6	Saúde do Neurônio	76
4.3	Rede Neuroenergética	77
4.3.1	Auto-organização da Estrutura Base	77
4.3.2	Alternância entre os Regimes de Sono e Vigília	79
4.3.3	Consumo de Energia durante o Ciclo Diário	82
4.4	Resultados Experimentais	84

4.4.1	Decisões de Projeto	85
4.4.1.1	Algoritmos Principais	86
4.4.1.2	Grau de Degeneração	88
4.4.1.3	Geração de Impulsos	88
4.4.1.4	Limiar Estático	89
4.4.1.5	Limiar Puro	90
4.4.1.6	Consumo de Energia	90
4.4.1.7	Conexões Interneurais	91
4.4.1.8	Saúde do Neurônio	92
4.4.2	Formação do Estado Inicial	92
4.4.3	Auto-organização da Estrutura Base	94
4.4.3.1	Excitação Externa	98
4.5	Resumo	99
5	Agente Neuroenergético	101
5.1	Introdução	101
5.1.1	Organização do Capítulo	102
5.2	Memória	102
5.2.1	Componentes da Memória	103
5.2.2	Características dos Grupos Neurais	104
5.2.3	Auto-organização da Memória Associativa	106
5.3	Centro Emocional	109
5.3.1	Neurônios do Centro Emocional	110
5.3.2	Saúde – Q^ϵ	111
5.3.3	Distribuição dos Neurônios – $n^\theta(\Theta)$	112
5.3.4	Variação de Θ_c	115
5.3.5	Válvula de Alimentação	116
5.4	Dinâmica da Relação entre Centro Emocional e Memória	117

5.4.1	Indentação	117
5.4.1.1	Fase de Formação do Objetivo	118
5.4.1.2	Fase de Resolução do Problema	120
5.4.1.3	Fase de Avaliação da Solução	122
5.4.2	Tomada de Decisões e Execução de Ações	123
5.4.2.1	Mecanismo de Ação – η_1	124
5.4.2.2	Grau de Confiança – η_2	124
5.4.2.3	Grau de Cautela – η_3	125
5.4.2.4	Mecanismo de Proteção – η_4	125
5.5	Regime de Subconsciência	125
5.5.1	Regeneração do Vocabulário Passivo	128
5.5.2	Otimização da Memória	128
5.5.3	Formação de Novas Hipóteses	129
5.6	Sistema de Auto-excitação	130
5.7	Resumo	131
6	Análise do Agente Neuroenergético	133
6.1	Introdução	133
6.1.1	Organização do Capítulo	133
6.2	Neurônio e Rede Neuroenergética	134
6.3	Agente Neuroenergético	135
6.3.1	Sob a Ótica da Semiótica	137
6.4	Resumo	139
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	141
	Referências Bibliográficas	144

Lista de Figuras

3.1	Modelo para o agente neuroenergético	45
3.2	Dependência de $g_2(\Theta)$ e Π_0 a Θ	48
3.3	Organização física dos neurônios da massa neural e do centro emocional	49
3.4	Distribuição dos neurônios do centro emocional em função de Θ	55
4.1	Dependência do limiar dinâmico Π_d ao tempo τ	64
4.2	Dependência da frequência (v_0) ao potencial resultante (U)	66
4.3	Dependência do limiar puro (Π_0) ao grau de degeneração (Θ)	69
4.4	Dependência do consumo (g_3) à reserva de energia do neurônio (H)	71
4.5	Dependência do consumo (g_2) ao grau de degeneração do neurônio (Θ)	72
4.6	Dependência do consumo (g_1) à frequência de geração de impulsos (v)	73
4.7	Diagrama da relação entre os GAM no regime de sono	80
4.8	Alterações no neurônio ao longo de um ciclo diário.	81
4.9	Variação de $\bar{\Theta}$ e $\bar{H}$ ao longo de um ciclo diário, sem excitação externa	82
4.10	Variação de $\bar{\Theta}$ e $\bar{H}$ para o alongamento do ciclo diário devido à excitação externa	84
4.11	Variação de Π_S e v num neurônio com conexões	89
4.12	Variação de Θ e v na formação do estado inicial da rede	93
4.13	Variação das reservas e do consumo em um neurônio isolado, no estado inicial	94
4.14	Variação de $\bar{\Theta}$ e $\bar{v}$ na formação da estrutura base da rede	95

4.15	Variação de Θ e v na formação da estrutura base da rede	95
4.16	Variação da condutividade das conexões excitatórias e do número de conexões in- ibitórias	96
4.17	Consumo de energia da rede durante o estado inicial e na formação da estrutura base	97
4.18	Variação de $\overline{\Theta}$ e $\overline{H}$ ao longo de um ciclo diário, na formação da estrutura base . . .	98
4.19	Influência do fluxo de excitação externa no ciclo diário	99
5.1	Formação de grupos primários	107
5.2	Formação da cadeia de grupos primários	108
5.3	Formação do grupo secundário	108
5.4	Formação de conexões compensatórias do GS para os GP	109
5.5	Dependência de v a Q^ϵ devido à variação de Π_R e Π_E	112
5.6	Distribuição n^θ no estado neutro e após primeiro sinal	113
5.7	Variação de n^θ e Q^ϵ ao longo do tempo	114
5.8	Conexões do centro emocional e da válvula de alimentação	116
5.9	Interação cíclica entre a memória e o centro emocional	118
5.10	Variação de Q^ϵ , Q^m e n^ϵ durante a indentação	119
5.11	Interconexão das unidades do agente durante o regime de subconsciência	127

Notação

Θ	Grau de degeneração do neurônio.
Θ_c	Grau de degeneração crítico, a partir do qual o consumo de energia do neurônio aumenta e o limiar puro diminui acentuadamente.
Θ_{c_N}	Valor normal de Θ_c dos neurônios do centro emocional, que ocorre quando a quantidade de neurônios que entra e sai da região crítica é igual.
Θ_E	Grau de degeneração a partir do qual Π_0 é menor do que Π_E e o neurônio consegue gerar impulsos espontaneamente.
$\bar{\Theta}$	Grau de degeneração médio dos neurônios da rede neuroenergética.
n^ϵ	Quantidade de focos de excitação na memória.
v	Frequência de geração de impulsos do neurônio no último intervalo de tempo.
$v_0(U)$	Função que determina a frequência de geração de impulsos do neurônio.
$\pi(U)$	Componente probabilística para o início da geração de impulsos após um período de inatividade.
v_{min}	Frequência mínima de geração de impulsos.
v_{opt}	Frequência ótima de geração de impulsos.
v_{max}	Frequência máxima de geração de impulsos.
$\bar{v}$	Frequência média de geração de impulsos dos neurônios da rede neuroenergética.
U	Potencial resultante do neurônio.
Π	Limiar de excitação que dificulta a geração de impulsos, composto pela soma de Π_0 e Π_S

Π_d	Limiar dinâmico de um neurônio biológico. Este limiar sofre uma grande variação no curto intervalo de tempo entre dois disparos. Como o neurônio neuroenergético opera em intervalos de tempo discreto, esta variação não é utilizada. O limiar dinâmico serve apenas como base para a criação da função $v_0(U)$.
Π_E	Limiar de exaltação, que é o limite para a entrada na região de exaltação, na qual o neurônio consegue gerar impulsos na frequência mínima.
Π_R	Limiar de refração, que limita a região de refração relativa, na qual ocorre a geração de impulsos em alta frequência.
Π_0	Limiar puro, que depende de Θ , e tem por finalidade impedir que neurônios já regenerados gerem impulsos.
Π_S	Limiar estático, definido em função da história de geração de impulsos do neurônio, cuja finalidade é impedir que neurônios gerem impulsos em alta frequência por muito tempo, e também simular a facilitação pós-tetânica.
Ψ	Variável auxiliar para o cálculo de Π_S .
W	Potencial de entrada do neurônio, composto pela soma de W^+ e W^- .
W^+	Potencial excitatório.
W^-	Potencial inibitório.
ϱ_{ji}	Condutividade da conexão do j -ésimo ao i -ésimo neurônio.
$\varrho_{s_{ji}}$	Componente estático (lento) de ϱ_{ji}^+ .
$\varrho_{d_{ji}}$	Componente dinâmico (rápido) de ϱ_{ji}^+ .
Ξ_{1j}	Capacidade do neurônio emissor de modificar a condutividade das conexões (membrana pré-sináptica $\rightarrow$ fenda sináptica).
Ξ_{2i}	Capacidade do neurônio receptor de modificar a condutividade das conexões que chegam até ele (fenda sináptica $\rightarrow$ membrana pós-sináptica).
$\pi_{\varrho_{ji}}$	Probabilidade de transformação de uma conexão excitatória entre os neurônios j e i , em uma conexão inibitória ($\varrho_{ji}^+ \rightarrow \varrho_{ji}^-$).
I	Alimentação/energia fornecida ao neurônio.

H	Reservas de energia do neurônio.
H'	Variação das reservas de energia (crescimento/decréscimo).
H_N	Valor normal das reservas de energia.
$\overline{H}$	Valor médio das reservas de energia dos neurônios da rede neuroenergética.
$\overline{H}_{min}$	Valor mínimo de $\overline{H}$ para que a rede possa entrar no regime de sono sem que seus neurônios morram.
g	Consumo de energia do neurônio.
$g_1(v)$	Consumo de energia devido à geração de impulsos.
$g_2(\Theta)$	Consumo de energia relacionado ao transporte de elementos através da membrana, dependente do grau de degeneração do neurônio.
$g_3(H)$	Consumo de energia devido à manutenção das reservas.
Q	Saúde do neurônio.
Q^ϵ	Saúde média dos neurônios do centro emocional.
$\chi(Q^\epsilon)$	Função de indicando o grau de encorajamento para determinada conexão em função de Q^ϵ .
$n^\theta(\Theta)$	Distribuição dos neurônios do centro emocional em função do seu grau de degeneração.
Q^m	Saúde média dos neurônios da massa neural.
σ	Fluxo externo de excitação que adentra a rede através dos receptores.
σ_{opt}	Fluxo ótimo de excitação que permite à rede reduzir o consumo e aumentar a duração do regime de vigília.
η_1	Mecanismo de ação, que influencia o valor de Q^ϵ através da variação de Θ_c dos neurônios do centro emocional.
η_2	Grau de confiança do agente em tomar determinada decisão.
η_3	Grau de cautela do agente ao tomar determinada decisão.

η_4	Mecanismo de proteção que visa evitar que a saúde do centro emocional se deteriore a ponto de ocorrerem eventos letais.
X^m	Sinal excitatório enviado por grupos primários ativos ao centro emocional.
GAM	Grupo de Auxílio Mútuo: formado durante o regime de sono, consiste num conjunto de neurônios associados através de conexões excitatórias, com a finalidade de regenerar-se. Os GAM formam uma fila cíclica em que se alternam na geração de impulsos em alta frequência, sendo dissolvidos após o regime de sono.

Capítulo 1

Introdução

*“Ora (dizeis) ouvir estrelas! Certo
Perdeste o senso!” E eu vos direi, no entanto,
Que, para ouvi-las, muita vez desperto
E abro as janelas, pálido de espanto...*

(“Via Láctea” - Olavo Bilac)

1.1 Prólogo

As tentativas de construir sistemas inteligentes artificiais têm se intensificado ao longo das últimas décadas e adquirido cada vez mais importância nos centros de pesquisa e na comunidade científica. Por um lado, este interesse ocorre porque a construção de máquinas autônomas e inteligentes oferece grandes perspectivas de retorno econômico, por permitir a atuação em situações e lugares em que o ser humano não pode estar presente. Por outro lado, o fenômeno da inteligência é ainda um “ilustre desconhecido” quando considerado sob seu aspecto mais filosófico de intencionalidade, consciência, criatividade, etc., e tem intrigado o ser humano desde os tempos da filosofia grega. A possibilidade de verificar e comprovar teorias acerca da origem e do modo de funcionamento da inteligência em organismos biológicos, especialmente nos seres humanos, é uma grande motivação para as pesquisas neste campo.

Muitos dos sistemas artificiais desenvolvidos apresentam características passíveis de serem chamadas de “inteligentes”, como capacidade de memória e aprendizado, modelagem do ambiente, etc. As abordagens para a construção destes sistemas variam bastante, desde processamento

simbólico através de regras e lógica, como nos sistemas especialistas, até sistemas cujo funcionamento está inspirado em estruturas e mecanismos biológicos, como as redes neurais e os processos evolutivos. Mas até o momento, a maioria dos sistemas artificiais é apenas capaz de desempenhar tarefas específicas ou operar em ambientes relativamente simples. O grande passo, no sentido de criar sistemas inteligentes gerais e autônomos, similares aos seres humanos, ainda não foi dado. Chamamos de sistemas inteligentes gerais aqueles que podem operar em ambientes nos quais “entre limites suficientemente amplos, qualquer coisa pode tornar-se uma tarefa” (Verschure, 1993).

Neste trabalho apresentamos o modelo de um sistema inteligente proposto pelo pesquisador russo Emelyanov-Yaroslavsky (1990), o *agente neuroenergético*. Este modelo é fortemente inspirado nos sistemas biológicos, uma vez que é baseado num elemento de limiar dinâmico, que apresenta um funcionamento similar ao de um neurônio, chamado de neurônio neuroenergético¹. É importante ressaltar que o neurônio neuroenergético difere substancialmente dos neurônios das redes neurais artificiais tradicionais (*feed-forward*, Kohonen, etc.). Enquanto estes neurônios basicamente aplicam uma função sobre os dados de entrada e têm a atividade controlada pelo fluxo de dados (ou impulsos), o neurônio neuroenergético possui várias funções e restrições que regem seu comportamento, que é determinado principalmente por fatores internos e não por impulsos externos. Todo o sistema baseia-se na premissa de que os neurônios estão numa constante luta por sobrevivência (o que significa que podem morrer), e esta luta se manifesta sob a forma de consumo de energia para regeneração própria e busca por otimização deste consumo, haja vista que a quantidade de energia disponível é limitada e escassa.

A atividade dos neurônios, interconectados, sujeitos a algumas limitações (degeneração ao longo do tempo, dificuldade de regeneração, energia limitada, etc.), e organizados em algumas estruturas básicas, permite que surjam no agente propriedades típicas de sistemas inteligentes, tais como: formação de memória, criação independente de objetivos, execução de atividades no sentido de satisfazer estes objetivos, capacidade de generalização e associação, etc. Especialmente interessante é o fato de que estas características surgem quase que como ‘efeito colateral’, isto é, como comportamento emergente de um sistema complexo no qual o objetivo primordial é a minimização do consumo de energia.

Além disso, o agente neuroenergético não possui uma forma explícita de representação do conhecimento. Não existe uma separação nítida entre percepção, representação e ação, ou entre estrutura e operações, de forma que o “conceito neuroenergético de inteligência” (Emelyanov-

¹Emelyanov-Yaroslavsky chama-o de “*live*” neuron, e a rede neural de “*live*” neural network (Emelyanov-Yaroslavsky & Potapov, 1992a,b), nomes estes que consideramos inadequados, e por isto utilizamos outro, também empregado pelo autor: *neuroenergético*.

Yaroslavsky, 1992) aproxima-se muito das recentes teorias cognitivas propostas por Edelman (1987); Maturana & Varela (1980), entre outros (embora não haja referências ou indicações de que Emelyanov-Yaroslavsky tinha conhecimento destas teorias).

1.1.1 Organização do Capítulo

Este capítulo inicia com a motivação que nos levou a desenvolver este trabalho (Seção 1.2). Em seguida (Seção 1.3) apresentamos um breve histórico da inteligência artificial, ressaltando alguns aspectos que podem auxiliar na compreensão e avaliação do agente neuroenergético, bem como algumas observações a respeito de como os conceitos provenientes da semiótica tem sido utilizados na construção de sistemas inteligentes. Finalmente na Seção 1.4, apresentamos a estrutura dos demais capítulos do trabalho.

1.2 Motivação

Qual é a origem da inteligência?

De acordo com Franklin (1995) esta é uma das três perguntas que mais têm intrigado a humanidade, pelo menos desde os tempos da filosofia grega (sendo as outras duas a respeito da origem do universo e da vida). E de certa forma, é esta a pergunta que o grupo de Semiótica Computacional² procura responder, quando busca mecanismos para construir sistemas artificiais inteligentes, capazes de processar os mais diversos tipos de signo e realizar processos cognitivos similares aos realizados pelo ser humano. O grupo surgiu a partir do trabalho de Gudwin (1996a), que lançou a base teórica da Rede de Agentes, implementada e estendida por Guerrero (2000) e Gomes (2000). Basicamente, a rede de agentes é uma ferramenta para a construção de sistemas inteligentes, e é utilizada em diversos trabalhos do grupo, como por exemplo para controle de navegação de um veículo autônomo (Suárez, 2000).

O presente trabalho segue uma linha um pouco diferente, por não utilizar a rede de agentes, mas contribui com o objetivo maior do grupo, que é o de estudar as interrelações entre semiótica e sistemas inteligentes, a fim de criar uma nova geração de sistemas inteligentes, ou “sistemas cognitivos”. Objetivo este que está muito em voga e é apontado como a grande revolução da computação no século XXI. A pertinência do assunto pode ser verificada pelo interesse da Agência

²Computacional Semiotic Group – <http://www.dca.fee.unicamp.br/projects/semiotics>

de Projetos de Pesquisa Avançada do Departamento de Defesa dos Estados Unidos³, que lançou em junho de 2002 um programa de financiamento para

“pesquisas inovadoras na área de tecnologia da informação para uma nova classe de sistemas cognitivos que podem ser caracterizado da seguinte maneira: um sistema cognitivo é um sistema que, entre outras coisas,

- *é capaz de raciocinar de várias maneiras, usando quantias substanciais de informação apropriadamente representada;*
- *pode aprender de suas próprias experiências de forma que sua performance aumenta à medida em que acumula conhecimento e experiência;*
- *sabe explicar-se a si mesmo e aceitar instruções;*
- *é consciente de seu próprio comportamento e capaz de refletir sobre suas capacidades; e*
- *responde de maneira robusta a surpresas*

(...) sistemas cognitivos são possivelmente melhor caracterizados como 'sistemas que sabem o que estão fazendo'. (DARPA, 2002, pág. 1)”

O objetivo deste trabalho é o de investigar as redes neurais e o agente neuroenergético propostos por Emelyanov-Yaroslavsky (1990), a fim de analisar suas propriedades semióticas (capacidade de processamento e geração de signos) e potencialidades para o desenvolvimento de um sistema cognitivo, comparando-o com outros sistemas inteligentes apresentados na literatura. Vamos como principais colaborações do trabalho:

- Levantamento bibliográfico e extensa explanação do assunto, devido à inacessibilidade da maior parte da bibliografia (em língua Russa).
- Implementação da rede neural neuroenergética a fim de verificar suas propriedades e a viabilidade de sua utilização na construção de agentes inteligentes.
- Análise do modelo de agente proposto por Emelyanov-Yaroslavsky sob o ponto de vista da inteligência artificial e da semiótica, visando uma avaliação de suas potencialidades, especialmente diante das teorias cognitivas surgidas nos últimos anos.

³Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA).

1.3 Histórico da Pesquisa

Como já dissemos, a busca pela origem da inteligência é muito antiga, e várias teorias foram propostas na tentativa de explicar este fenômeno. Com a invenção do computador, muitos cientistas passaram a se perguntar se não seria possível reproduzir nele o comportamento inteligente humano, e a partir de pesquisas neste sentido na década de 50, surgiu um novo campo de investigação da inteligência: o campo da *inteligência artificial*.

1.3.1 Inteligência Artificial Simbólica

A primeira maneira pela qual se procurou construir sistemas inteligentes ficou conhecida como Inteligência Artificial Simbólica. A IA Simbólica intenta construir sistemas inteligentes utilizando lógica matemática para representação de conhecimento e realização de inferências. De acordo com Shanahan (1997), toda e qualquer forma de representação pode ser reduzida à lógica formal, e por isso a lógica é uma boa opção para formalizar o conhecimento e o processo de raciocínio humanos (Varzinczak, 2002). São exemplos clássicos de sistemas simbólicos os sistemas especialistas, programados para atuar em uma área bem específica do conhecimento (diagnóstico de câncer de mama, jogo de xadrez, etc.), e desenvolvidos através de uma metodologia *top-down*, em que o conhecimento do projetista é fundamental para o bom desempenho do sistema.

O funcionamento analítico dos sistemas simbólicos pode ser descrito resumidamente pelos seguintes passos (*apud*. Verschure, 1993):

1. Caracterizar a situação em termos de objetos identificáveis com propriedades bem definidas;
2. Encontrar regras gerais que se apliquem a outras situações em termos destes objetos e situações;
3. Aplicar as regras à situação do passo 1., retirando as conclusões sobre o que deveria ser feito.

Desta forma, a IA simbólica sugere que o fenômeno da inteligência é uma consequência da lógica dos algoritmos que o cérebro supostamente executa. Como algoritmos podem ser instanciados em diversos tipos de implementação, a IA Simbólica leva a crer que inteligência pode ser obtida sem um cérebro biológico, ou melhor, que não há uma dependência entre a estrutura física e lógica de um sistema inteligente.

Mas os resultados obtidos pelos sistemas simbólicos não foram tão bons quanto inicialmente esperado. À medida em que as pesquisas progrediam, grandes problemas desta abordagem tornaram-se visíveis e mostraram-se de difícil solução. Basicamente, a causa dos problemas está no fato de que o comportamento dos sistemas simbólicos é derivado de uma base de conhecimento previamente existente, ou seja, eles assumem possuir um conhecimento completo (codificado pelo projetista) desde o início de seu funcionamento, e toda capacidade de aprendizado resume-se a melhorar os mecanismos de busca e criar novas associações entre os elementos do conhecimento (símbolos). Os problemas clássicos desta abordagem são:

O Problema do Enquadramento (*frame problem*): refere-se à impossibilidade de o sistema manter um modelo atualizado do ambiente externo quando opera em tempo real, especialmente em ambientes dinâmicos, devido ao crescimento exponencial das possibilidades que precisam ser analisadas.

O Problema da Falta de Fundamento Simbólico (*symbol-grounding problem*): os símbolos do sistema não estão ligados à sua experiência, à sua percepção. Seu significado é proveniente da conexão com outros símbolos e da maneira com que são processados, de forma que não há um significado “real” baseado no ambiente externo em que o sistema está inserido. O sistema não sabe efetivamente o que os símbolos significam.

O Problema da Visão de Referência (*frame-of-reference problem*): a ontologia do sistema simbólico não é uma ontologia própria, construída através da interação com o ambiente, e sim a ontologia definida pelo projetista, baseada na experiência deste. Como o sistema é incapaz de gerar seus próprios símbolos, sua ontologia é estática, o que certamente o levará a ter comportamentos inapropriados em ambientes dinâmicos ou em situações imprevistas.

O Problema da Contextualização (*situatedness problem*): refere-se à necessidade dos sistemas inteligentes de lidar com um ambiente dinâmico, parcialmente desconhecido e imprevisível. Os sistemas simbólicos tradicionais são equipados com modelos do ambiente em que operam, e agem de acordo com planos desenvolvidos sobre estes modelos. O problema é que é impossível manter estes modelos atualizados (problema do enquadramento). Um agente *situado* é capaz de determinar o que é relevante interagindo com a situação: ele não precisa de modelos sofisticados, uma vez que o ambiente real faz parte do “conhecimento” de que ele precisa para tomar suas decisões.

1.3.2 Inteligência Artificial Conexionista

A Inteligência Artificial Conexionista trouxe um novo paradigma de programação e resolução de problemas, baseado nas redes neurais artificiais (RNA), e surgiu a partir do reconhecimento de que o cérebro opera de uma maneira completamente diferente da de um computador digital. Embora haja muitas diferenças entre funcionamento e estrutura de RNA e de sistemas neurais biológicos, as RNA utilizam um princípio semelhante ao *modus operandus* do cérebro: processamento massivamente paralelo efetuado por unidades de processamento bastante simples, mas fortemente interconectadas entre si. De acordo com (Haykin, 1994, pág.2),

“uma rede neural é um processador massivamente paralelo que tem uma propensão natural para armazenar conhecimento experimental e tornar este conhecimento disponível para uso. Ela assemelha-se ao cérebro em dois aspectos:

- 1. O conhecimento é adquirido pela rede através de um processo de aprendizado; e*
- 2. A intensidade das conexões interneuronais, chamada peso sináptico, é utilizada para armazenar o conhecimento.*

O estímulo inicial que conduziu ao desenvolvimento das RNA foi o de entender e replicar o funcionamento do cérebro humano, mas é de consenso geral que este objetivo ainda está longe de ser atingido (von Zuben, 2001). Não obstante, as RNA têm se mostrado ferramentas muito úteis na resolução de problemas das mais diversas áreas, sendo especialmente eficientes para reconhecimento de padrões, predição de séries, controle adaptativo, aproximação de funções, etc. Uma das características mais marcantes das RNA é a ausência de um controle centralizado. O controle é distribuído, pois cada neurônio decide sua saída exclusivamente em função da entrada que recebe dos neurônios vizinhos. Outra vantagem em relação aos sistemas simbólicos é que as RNA sempre produzem uma saída, para qualquer que seja a entrada. Nos sistemas simbólicos, o projetista tem que se preocupar com a definição de saídas padrão para situações de erro ou inesperadas. Além disso, sistemas simbólicos não são resistentes a falhas. Erros aparentemente pequenos podem causar falhas gerais no sistema. Já a representação distribuída dos sistemas conexionistas faz com que a falha de alguns componentes normalmente tenha como consequência apenas uma degradação de performance.

A experiência com as RNA pode não ter resultado numa resposta satisfatória à pergunta quanto à origem do fenômeno da inteligência, mas levou muitos pesquisadores a voltarem-se para os exemplos da natureza, a fim de extrair dela novos mecanismos para solução de problemas. Desta

forma, surgiram os paradigmas de computação evolutiva, vida artificial, sistemas imunológicos artificiais, etc., que utilizam-se de processos semelhantes a seus modelos biológicos para resolver problemas das mais diversas áreas, trazendo importantes contribuições para a compreensão do modo de funcionamento dos sistemas naturais e de seu comportamento, e também avanços significativos na construção de sistemas inteligentes artificiais.

1.3.2.1 Neurônio Artificial

O insucesso das RNA em reproduzir o fenômeno cognitivo é devido, entre outras coisas, à modelagem mecanicista e muitas vezes simplista feita do neurônio biológico. A teoria clássica de RNA descreve o neurônio artificial como uma unidade de entrada/saída com uma função de transferência. Podemos identificar três elementos básicos no modelo do neurônio *perceptron* (Haykin, 1994): 1) Um conjunto de *sinapses* ou *conexões* de entrada, sendo cada uma ponderada por um *peso sináptico*; 2) uma *junção de soma* responsável pela combinação aditiva dos sinais de entrada ponderados pelos pesos sinápticos; e 3) uma *função de transferência* ou *função de ativação*, geralmente não-linear, representando um efeito de saturação na ativação de saída.

Neurônios biológicos reais são muito mais complexos do que isto. Eles têm uma dinâmica intrínseca que transforma a entrada em uma sequência de impulsos elétricos, que são transmitidos a outros neurônios através do axônio. Existem vários modelos que buscam replicar o funcionamento do neurônio biológico de uma maneira mais fiel, como por exemplo os *spiking neurons* (Gerstner, 2002; Maass, 1996), levando em consideração a questão temporal dos disparos. Mas um grande problema de todos estes modelos neurais é que eles não são capazes de responder à pergunta: por quê as redes neurais surgiram em sistemas biológicos? Por quê os neurônios, que são células relativamente autônomas, precisam se unir e transmitir impulsos entre si? Qual a vantagem?

É neste ponto que o neurônio neuroenergético (Emelyanov-Yaroslavsky & Potapov, 1992a) apresenta sua grande contribuição. Ao contrário dos outros modelos, em que a atividade dos neurônios é controlada pela entrada de dados/impulsos, o neurônio neuroenergético é auto-controlado. Sendo considerado um elemento “vivo”, ele tem por objetivo minimizar o consumo de energia, e assim sobreviver num ambiente de escassez de “alimento”. A redução no consumo pode ser obtida através da geração de impulsos que, antes de ser um processo de comunicação, é vista como um processo de regeneração do neurônio. A necessidade de interconexão surge então da necessidade de receber potencial excitante suficiente para gerar impulsos e assim reduzir o consumo de energia. Desta forma, é um objetivo interno que dirige a atividade do neurônio, sendo a entrada de impulsos

apenas secundária.

A capacidade de auto-controle do neurônio neuroenergético tem como consequência que a rede neuroenergética é uma rede auto-organizável, apresentando padrões de comportamento que chamamos de *sono* e *vigília*, totalmente independentes da entrada externa de dados/impulsos. A auto-organização da rede neuroenergética, ao contrário do que ocorre com as redes auto-organizáveis de Kohonen (Haykin, 1994), não se dá em função de impulsos de entrada. Os impulsos são introduzidos durante o regime de vigília com o objetivo de possibilitar o surgimento das funções inteligentes da rede: capacidade de memória e generalização, atuação no ambiente, solução de problemas, etc., que serão analisados detalhadamente no decorrer do trabalho.

1.3.3 Arquiteturas de Agentes Inteligentes

De acordo com Russel & Norwig (1995), um “*agente é qualquer coisa que percebe seu ambiente através de sensores, e age neste ambiente através de atuadores*”. Um *agente racional* ideal é aquele que “executa sempre as ações que espera que irão maximizar sua medida de performance, com base nas evidências fornecidas pela percepção até aquele momento, e pelo conhecimento interno do agente”. E um agente é *autônomo* na medida em que a escolha das suas ações depende de sua própria experiência, ao invés de depender de conhecimento do ambiente pré-programado pelo projetista.

A princípio estas definições parecem bastante intuitivas, mas da mesma forma que são de fácil compreensão, sua implementação em agentes concretos não tem sido uma tarefa fácil. Diversas arquiteturas foram propostas para a construção de agentes, entre as quais podemos destacar (Weiss, 1999):

Arquiteturas baseadas em lógica: são sistemas que implementam o paradigma simbólico de raciocínio e representação de conhecimento, tendo um bom desempenho em ambientes estáticos e simples, mas sofrem com as limitações da abordagem simbólica que vimos anteriormente.

Arquiteturas reativas: surgiram como uma alternativa aos sistemas simbólicos, e caracterizam-se basicamente: 1) por uma atuação meramente reativa, sem efetuar qualquer tipo de raciocínio ou representação simbólica; 2) pela idéia de que o comportamento inteligente e racional está intimamente ligado ao ambiente em que o agente está inserido, ou seja, é uma consequência da interação entre o agente e seu ambiente; e 3) pela noção de que o

comportamento inteligente *emerge* a partir da interação de diversos comportamentos mais simples. Estas arquiteturas apresentam vantagens como: simplicidade, tratabilidade computacional e tolerância a falhas, mas sua principal desvantagem é que, como não mantém um modelo interno do ambiente, precisam que a informação necessária para a tomada de decisão esteja sempre disponível no ambiente;

Arquiteturas BDI: nos agentes BDI⁴ a tomada de decisões depende da manipulação de estruturas de dados representando suas crenças, desejos e intenções. Eles são baseados no *raciocínio prático* — processo de decidir, momento a momento, que ações devem ser tomadas para atingir os objetivos almejados. Este modelo é atrativo pela simplicidade do processo decisório, bastante intuitivo, e pela divisão clara da funcionalidade dos subsistemas necessários para a construção do agente. Mas a dificuldade reside em implementar eficientemente estas funções, especialmente em encontrar um balanceamento entre o comprometimento com as intenções e sua revisão.

Arquiteturas em Camadas: nestes sistemas a tomada de decisões é realizada através de várias camadas de software, cada uma raciocinando sobre o ambiente em diferentes níveis de abstração.

Além destas, há ainda muitas outras arquiteturas propostas na literatura, como os agentes emocionais, os agentes comunicativos, e os agentes semióticos (Gudwin, 2000), etc., que em geral são sistemas de arquitetura híbrida ou até certo ponto baseados nas arquiteturas apresentadas. A implementação das funcionalidades dos agentes também utiliza os mais diversos mecanismos, como lógica simbólica, computação evolutiva, redes neurais, entre outros. Mas a grande maioria dos agentes implementados serve apenas para resolver problemas específicos, em ambientes relativamente conhecidos e previsíveis. Eles não são sistemas inteligentes gerais capazes de operar nos mais diversos ambientes.

O que ocorre é que estes agentes operam em domínios para os quais o projetista forneceu uma representação, utilizada pelo agente para efetuar sua atividade. A capacidade do agente é portanto limitada pela representação que lhe é dada. De acordo com Reeke & Edelman (1988),

“tendo uma representação apropriada disponível, muitos problemas tornam-se amenos a soluções automáticas. Na nossa visão, entretanto, o problema que requer inteligência é o original, de encontrar uma representação. Colocar este problema no domínio do

⁴*belief-desire-intention.*

projetista do sistema ao invés de no domínio do sistema projetado, é esconder o problema, e reduzir inteligência à manipulação simbólica.”

A seguir queremos analisar algumas teorias provenientes de uma melhor compreensão do funcionamento dos sistemas biológicos, e que oferecem novas metodologias para a criação de sistemas inteligentes.

1.3.4 Teoria Autopoiética e Paradigma Promulgador

A *Teoria Autopoiética* de Maturana & Varela (1980) surgiu como uma alternativa à visão construtivista que se tinha dos sistemas biológicos, e com isto evidenciou algumas fraquezas nas arquiteturas existentes de sistemas inteligentes artificiais, especialmente no que tange o desenvolvimento de sistemas cognitivos. Em primeiro lugar, ela afirma que

“Cognição é um fenômeno biológico e só pode ser compreendido como tal; qualquer ‘insight’ epistemológico no domínio do conhecimento requer esta compreensão. (Maturana & Varela, 1980, pág. 7)”

Ou seja, a capacidade cognitiva é uma propriedade intrínseca dos sistemas vivos, e não consequência de algum tipo de raciocínio lógico. Isto não exclui a possibilidade de existirem sistemas cognitivos artificiais pois, de acordo com a teoria autopoiética, sistemas vivos (ou autopoiéticos) são aqueles capazes de:

- a) *manter a organização que os define, independentemente do histórico de perturbações ambientais e mudanças estruturais que ocorram, e*
- b) *regenerar seus componentes durante sua atividade (Whitaker, 2001).*

Ou seja, para ter capacidade cognitiva, o sistema necessariamente precisa apresentar as características fundamentais dos sistemas vivos.

Outro problema evidenciado pela teoria autopoiética diz respeito à organização construtivista dos sistemas inteligentes clássicos, em que o sistema é definido em função dos seus componentes. Apesar deste problema ser mais evidente nos sistemas simbólicos, também está presente em muitos sistemas conexionistas, nos quais as RNA são utilizadas em módulos com funções específicas (decisão, processamento da entrada, etc.), e/ou em conjunto com sistemas de regra e manipulação simbólica. A teoria autopoiética postula que num sistema cognitivo há uma interdependência e indissociabilidade entre forma e função:

“Sistemas não podem ser definidos simplesmente pela enumeração ou pelo arranjo dos elementos que o constituem. O atributo definitivo de um sistema é o conjunto de interrelações entre os componentes que:

- a) esboçam a forma do sistema em qualquer momento e*
- b) servem como a 'identidade' básica do sistema, que é mantida a despeito das mudanças dinâmicas ao longo do tempo. (apud Whitaker, 2001)”*

Inspirados na teoria autopoietica, Varela *et al.* (1991) propuseram o *paradigma promulgador*⁵, que define cognição em função de uma nova maneira de encarar a relação do sistema com *seu mundo*. Note que estamos falando do “mundo do sistema” ou seu *umwelt*⁶, e não do mundo “real” (seja isso o que for). A mesma idéia de interdependência interna entre forma e função da teoria autopoietica, está presente na relação do sistema com seu *umwelt*. Assim, cognição é definida como a história de interrelações e acoplamento estrutural que dá origem a um *umwelt*. Esta idéia de interdependência entre sistema e ambiente foi expressa de maneira bastante clara por Franklin (1995, pág. 382):

“(...) Eu sou o que sou devido a uma história de interações com 'meu' ambiente. Meu ambiente é o que é devido a suas interações comigo, e com outros agentes, forças, etc. Meu ambiente não é determinado pela minha estrutura abstrata sensório-motora, mas pela história da interação desta estrutura com meu ambiente. Há por exemplo grandes evidências de que a formação das conexões neurais no córtex visual depende da entrada de estímulos. Mas qual surgiu primeiro? Nenhum. Eles especificam-se mutuamente.”

A principal consequência desta interdependência é a ausência de representação interna do ambiente. Maturana (*apud*. Franklin, 1995, pág. 392), ao falar sobre o senso comum de que através de nossas interações com o ambiente adquirimos uma representação direta dele, argumenta que a busca por representações no cérebro será sempre infrutífera, pois a correspondência entre as mudanças estruturais que lá ocorrem, e os eventos que causaram estas mudanças, é histórica e não estrutural. As mudanças (sinápticas) não podem ser explicadas como um tipo de relação de referência entre determinadas estruturas neurais e o mundo externo, pois é sempre a atividade de todo o sistema nervoso que está envolvida.

Varela não aborda uma possível implementação computacional do sistema cognitivo que propõem, mas diz que ele “funciona através de uma rede consistindo de múltiplos níveis de sub-redes

⁵*Enactive paradigm.*

⁶*Umwelt*, de acordo com Uexküll, não é qualquer ambiente objetivo físico ou biológico do organismo, mas um mundo subjetivo formado pelo campo perceptual específico do organismo e a esfera de suas interações práticas, seu campo operacional (Nöth, 1990).

sensório-motoras interconectadas”, ou seja, deveria ser implementado numa estrutura de múltiplas camadas interligadas, cada uma com capacidades sensório-motoras, sem um sistema central de controle ou decisão. A arquitetura *subsumption* proposta por Brooks (1990) caminha neste sentido, mas foge do escopo deste trabalho. Uma proposta mais próxima do escopo do trabalho é a teoria da “Seleção de Grupos Neurais”, nosso próximo assunto.

1.3.5 Seleção de Grupos Neurais

O trabalho de Edelman (1987, 1992) também tem origem na biologia, e segue a mesma linha do trabalho de Maturana e Varela. O que Edelman busca explicar é como o fenômeno cognitivo ocorre no cérebro. Utilizando modelos computacionais para efeito de comprovação/teste de suas teorias, Edelman dá uma ênfase muito especial à questão da representação; de acordo com ele, não existe informação no ambiente, isto é, os objetos e categorias não são rotulados previamente como tais, de modo que

“um dos primeiros problemas que um sistema em desenvolvimento, ou uma teoria para o cérebro, precisa resolver, é como ele pode categorizar um ambiente não rotulado. A informação não está no ambiente, mas precisa ser extraída pelo sistema através de sua interação com o ambiente. O sistema não é um receptor de informações, mas um criador de critérios que o levam a ela” (Verschure, 1993).

Estas categorias criadas/extraídas pelo próprio sistema, devem permanecer flexíveis para que possam ser continuamente adaptadas, o que só é possível se elas estiverem acopladas ao *umwelt* do sistema (isto nos lembra do problema de falta de fundamento simbólico e contextualização dos sistemas simbólicos). Na proposta de Edelman as representações são dinâmicas e não-simbólicas, criadas pelo próprio sistema a partir de sua percepção do ambiente, ou seja, estão fundamentadas na experiência; e como o agente está situado no ambiente, elas podem ser constantemente revistas e adaptadas.

Mas como um sistema é capaz de criar suas classificações? Como pode reconhecer objetos/situações semelhantes a partir desta classificação? E como pode construir generalizações? As respostas sugeridas por Edelman passam por alguns conceitos chave: grupos neurais, mapeamentos, conjuntos de classificação⁷, funções globais e mapeamentos globais.

Os *grupos neurais* são coleções de neurônios formadas durante o desenvolvimento “pré-natal” do sistema (antes de qualquer experiência), e suas interconexões permitem que respondam

⁷ *classification couples.*

a determinados padrões de atividade sináptica. O conjunto dos grupos neurais recebe o nome de *repertório primário*. A partir da interação do sistema com o ambiente, forma-se o *repertório secundário*, através de modificações sinápticas intra e inter-grupais. Estes são os elementos do *sistema seletivo*: 1) população diversificada da qual selecionar, formada pelos grupos do repertório primário que evoluem para um repertório secundário e continuam a evoluir; 2) oportunidades para a seleção, providas pela interação com o ambiente; e 3) capacidade de amplificar/diferenciar os elementos selecionados, possibilitada pela modificação das sinapses dos grupos neurais selecionados.

De acordo com Franklin (1995, pág. 303),

“a função deste sistema seletivo é decidir o que fazer a seguir. A serviço desta função, instâncias de categorias precisam ser reconhecidas. Se o reconhecimento do sistema é muito específico, faz muitas distinções, e não pode haver categorias suficientes para todos os estímulos. Se o reconhecimento é muito amplo, pode ocorrer a confusão de estímulos com diferenças significativas. (...) O reconhecimento deve ocorrer num nível intermediário, permitindo que vários grupos respondam relativamente bem ao mesmo estímulo. A seleção ocorre entre estes grupos.”

O repertório primário deve ser suficientemente variado para que diversos grupos, com diferentes estruturas, sejam capazes de responder relativamente bem aos mesmo impulsos, ao que Edelman chama de *degeneração*. Neste sistema seletivo degenerado, com um grupo neural respondendo a diversos estímulos, qualquer problema perceptual tem diversas soluções. O contexto determina quais grupos respondem e são selecionados para terem suas sinapses realçadas ou suprimidas. Assim formam-se os *mapeamentos*, dos estímulos para as regiões do cérebro: posições próximas na retina, por exemplo, estão mapeadas em posições próximas no córtex.

A correlação temporal das respostas dos diversos grupos a um estímulo é feita por meio de sinais reentrantes. A *reentrância* é um processo dinâmico que evolui ao longo do tempo e reflete a continuidade espaço-temporal dos eventos e sinais no ambiente. Ela permite o surgimento de *conjuntos de classificação*, capazes de realizar classificações mais complexas do que os mapeamentos e grupos neurais que os compõem. Vários conjuntos de classificação, por sua vez, podem ser organizados em *mapeamentos globais*, que os conectam com estruturas básicas, não mapeadas do cérebro (relacionados aos desejos, planejamento de ações, memória e coordenação motora). Mapeamentos globais permitem categorizações em que percepção e ação são intimamente relacionados.

Edelman criou protótipos (Darwin I, II, III e IV) demonstrando o funcionamento dos principais conceitos de sua teoria — repertório primário, repertório secundário, reentrância — na tarefa

de criação de classificações e geração de comportamento. O detalhamento destes sistemas não será abordado aqui, mas eles são sem dúvida muito pertinentes à uma futura implementação do agente neuroenergético, uma vez que há semelhanças impressionantes⁸ entre seu trabalho, e o agente neuroenergético. As semelhanças ocorrem especialmente na organização do sistema em torno de grupos neurais, com a formação dos repertórios primário e secundário, etc. Mas o grande diferencial do conceito neuroenergético está na sua motivação: a otimização do consumo de energia, que guia toda a atividade do agente, desde o neurônio individual, até o agente como um todo. No Capítulo 6 fazemos uma comparação mais detalhada das duas abordagens, ressaltando suas diferenças e especialmente suas complementariedades.

1.4 Estrutura da Tese

Os capítulos que seguem estão organizados da seguinte maneira:

Capítulo 2 Traz uma visão geral da semiótica Peirceana, com ênfase especial nos processos de raciocínio e de criação de novos signos.

Capítulo 3 Apresenta de maneira resumida o funcionamento do neurônio, da rede, e do agente neuroenergético, destacando suas propriedades inteligentes e os requisitos para seu surgimento.

Capítulo 4 Neste capítulo detalhamos o funcionamento do neurônio neuroenergético apresentando as equações que regem seu comportamento, e analisamos as propriedades resultantes da interconexão destes neurônios numa rede. Também apresentamos os resultados obtidos através de uma simulação computacional do modelo.

Capítulo 5 Uma vez comprovadas as propriedades da rede neuroenergética, apresentamos o modelo do agente neuroenergético e descrevemos como o relacionamento entre seus componentes permite o surgimento de funções típicas de sistemas inteligentes.

Capítulo 6 Faz uma análise do neurônio, da rede e especialmente do agente neuroenergético, do ponto de vista da semiótica e da inteligência artificial.

⁸As semelhanças são especialmente interessantes uma vez que não há menção de que Emelyanov-Yaroslavsky tivesse conhecimento do trabalho de Edelman e vice versa.

Capítulo 7 O capítulo final contém a conclusão do trabalho, e apresenta algumas sugestões de como dar continuidade e viabilizar a implementação de um sistema computacional utilizando estes conceitos.

Capítulo 2

Semiótica Peirceana

*Progress in science
depends uppon the observation of the right facts
by minds furnished with appropriate ideas.*

(Charles S. Peirce)

2.1 Introdução

Nos últimos anos temos experimentado um crescente interesse pela semiótica nas mais diversas áreas do saber. Também na engenharia esse interesse tem se manifestado, especialmente na construção de sistemas inteligentes artificiais (Gudwin, 1996a; Meystel, 1996). Embora a semiótica se preocupe com a análise dos processos de significação e representação, especialmente em mentes humanas, ela pode ser uma ferramenta muito útil também na síntese, ou criação de sistemas inteligentes (Gudwin, 1999). Isto se dá basicamente de duas maneiras: em primeiro lugar, a semiótica auxilia na compreensão do funcionamento dos processos de significação, representação e raciocínio na mente humana, e desta forma pode fornecer subsídios e ferramentas para a replicação destes processos em sistemas artificiais. Em segundo lugar, a semiótica fornece alguns parâmetros através dos quais podemos verificar o “grau de inteligência” de um sistema artificial (Gudwin, 2000), ou seja, permite uma análise de sistemas artificiais em função da sua capacidade de processamento de signos.

Neste capítulo apresentamos de forma muito resumida os principais conceitos da semiótica desenvolvida por Charles S. Peirce, abordando especialmente o conceito peirceano de signo e os métodos de inferência ou de raciocínio. A semiótica peirceana é especialmente interessante para o

campo da inteligência artificial por sua característica universal. Ela aplica-se tanto aos processos de significação da mente humana, quanto a organismos biológicos mais simples, e até mesmo a eventos químicos e físicos. O objetivo deste capítulo é fornecer os subsídios necessários para a análise do agente neuroenergético proposto por Emelyanov-Yaroslavsky, a fim de avaliar sua viabilidade e potencialidade como sistema inteligente artificial.

2.1.1 Organização do Capítulo

Na primeira seção (Seção 2.2) procuramos responder à pergunta “o que é semiótica?” localizando o foco de estudo desta ciência. Na Seção 2.3 apresentamos as categorias em que se classificam todos os fenômenos possíveis, impossíveis, reais ou imaginários; e na Seção 2.4 introduzimos o conceito peirceano abstrato e lógico de signo, mas não sem antes ilustrar em um exemplo prático como os signos se manifestam. A Seção 2.5 aborda as divisões dos signos em função da classificação de cada um de seus componentes com relação às categorias fenomenológicas, e a Seção 2.6 analisa os três tipos de raciocínio que, segundo Peirce, são os únicos existentes. Finalmente, na Seção 2.7 fazemos um resumo geral do capítulo.

2.2 O que é Semiótica

Estamos, como seres vivos dotados de sensores que somos, imersos em um universo de sensações, de percepções, de experiências que se forçam sobre nós, compelindo-nos a dirigir nossa atenção e reagir a elas de alguma forma. Essas experiências são, de alguma forma, inseridas em um complexo sistema de relações através das quais recebem significado, ou seja, criamos um modelo mental para o universo sensível, e para cada nova experiência ou evento perceptível buscamos uma explicação, tentamos encaixar a nova experiência no modelo, ou atualizar o modelo para suportar a experiência. Enfim, criamos e usamos linguagens para a representação do universo.

Quando dizemos que criamos e usamos linguagens, não nos referimos apenas à linguagem verbal, composta de sons que transmitem conceitos, ou à sua tradução para um alfabeto visual (linguagem escrita), mas

“queremos nos referir a uma gama incrivelmente intrincada de formas sociais de comunicação e de significação que inclui a linguagem verbal articulada, mas absorve também, inclusive, a linguagem dos surdos-mudos, o sistema codificado da moda, da culinária e tantos outros” (Santaella, 1983, pág. 11).

Embora as linguagens antropomórficas sejam as mais evidentes para nós, de forma alguma a utilização de linguagens se restringe aos humanos. Tudo o que consideramos como sendo vivo - algo que se reproduz, que tem um comportamento esperado e certas propensões - utiliza-se de linguagens (basta verificarmos que o código genético nada mais é do que uma linguagem). Mais ainda, os sistemas artificiais utilizam-se de linguagens para interpretar os fenômenos a que são suscetíveis, e até mesmo no mundo inanimado das reações químicas, das leis da física, podemos identificar linguagens.

“Nessa medida, não apenas a vida é uma espécie de linguagem, mas também todos os sistemas e formas de linguagem tendem a se comportar como sistemas vivos, ou seja, eles se reproduzem, se readaptam, se transformam e se regeneram como as coisas vivas” (Santaella, 1983, pág. 14).

Logo, o conceito de vida está intimamente ligado à utilização de linguagens, ao processo de significação, e é justamente com o funcionamento do processo de significação, com o funcionamento das linguagens, que se preocupa a semiótica. Semiótica é o estudo da significação dos fenômenos, ou seja, a semiótica busca compreender como os fenômenos adquirem um significado, ou ainda:

“A Semiótica é a ciência que tem por objeto de investigação todas as linguagens possíveis, ou seja, todo e qualquer fenômeno como fenômeno de produção de significação e sentido.

[...] Nos fenômenos, sejam eles quais forem — uma nesga de luz ou um teorema matemático, um lamento de dor ou uma idéia abstrata da ciência —, a Semiótica busca divisar e deslindar seu ser de linguagem, isto é, sua ação de signo. Tão-só e apenas. E isto já é muito” (Santaella, 1983, pág. 13–14).

2.3 Categorias Fenomenológicas

O ponto de partida da semiótica peirceana é a experiência ela mesma, sem qualquer pressuposto ou limitação. Peirce considerou como unidade experimentável (fenômeno ou phaneron) tudo aquilo que aparece à mente, sem nenhuma moldura preestabelecida. Sua noção de fenômeno não está limitada a algo que se possa sentir, perceber, inferir, lembrar ou localizar num instante espaço-temporal, no que chamamos de “mundo real”. Fenômeno, para Peirce, é

“qualquer coisa que esteja de algum modo e em qualquer sentido presente à mente, isto é, qualquer coisa que apareça, seja ela externa (uma batida na porta, um raio de

luz, um cheiro de jasmim), seja ela interna ou visceral (uma dor no estômago, uma lembrança ou reminiscência, uma expectativa ou desejo), quer pertença a um sonho, ou uma idéia geral e abstrata da ciência” (Santaella, 1983, pág. 34).

A fenomenologia é, segundo Peirce, a descrição e análise das experiências que estão em aberto para todo homem, a cada instante, em todo lugar. E começa no aberto, na experiência, sem quaisquer pressupostos que de antemão dividam os fenômenos em verdadeiros ou falsos, reais ou imaginários, certos ou errados. Dizia Peirce:

“A fenomenologia ou doutrina das categorias tem por função desenredar a emaranhada meada daquilo que, em qualquer sentido, aparece, ou seja, fazer a análise de todas as experiências é a primeira tarefa a que a filosofia tem de se submeter. Ela é a mais difícil de suas tarefas, exigindo poderes de pensamento muito peculiares, a habilidade de agarrar nuvens, vastas e inatingíveis, organizá-las em disposição ordenada, recolocá-las em processo” (apud Santaella, 1983, pág. 32).

Vários filósofos se propuseram a classificar a multiplicidade dos fenômenos em um número limitado de categorias. Espaço e tempo, por exemplo, foram classificados como sendo categorias por serem irreduzíveis a outros fenômenos na nossa experiência. As classificações mais conhecidas são as de Aristóteles, que criou dez categorias, e Kant, que criou doze.

Peirce dedicou-se intensamente à tarefa de classificar os fenômenos, e inovou ao fazê-lo não por características que os fenômenos tenham em comum (como o fizeram seus predecessores), mas pela maneira através da qual os fenômenos se apresentam à mente, ou seja, criou três metacategorias ou regras de formação de categorias. Ele concluiu que tudo o que aparece à mente, o faz numa gradação de três propriedades, que correspondem aos três elementos formais de qualquer experiência. São as modalidades mais universais e gerais, através das quais se opera toda apreensão e tradução dos fenômenos. A essas categorias, Peirce deu o nome de primeiridade, secundidade e terceiridade, definindo-as da seguinte maneira:

“Primeiridade é o modo de ser do que é assim, como é, positivamente e sem referência a nenhuma outra coisa (ser uni-situacional). Secundidade é o modo de ser do que é assim, como é, em referência a um segundo, mas sem consideração de um terceiro (ser di-situacional). Terceiridade é o modo de ser do que é assim, como é, enquanto estabelece a inter-relação entre um segundo e um terceiro (tri-situacional)” (apud Walther-Bense, 2000, pág. 2).

2.3.1 Primeiridade

A primeiridade é a categoria da possibilidade (visto que é independente de tempo e espaço), da qualidade pura, não encarnada, do sentimento sem reflexão, da liberdade, do acaso. É o azul do céu, sem o céu.

“O primeiro (primeiridade) é presente e imediato, de modo a não ser segundo para uma representação. Ele é fresco e novo, porque, se velho, já é um segundo em relação ao estado anterior. Ele é iniciante, original, espontâneo e livre, porque senão seria um segundo em relação a uma causa. Ele precede toda síntese e toda diferenciação; ele não tem nenhuma unidade nem partes. Ele não pode ser articuladamente pensado; afirme-o e ele já perdeu toda sua inocência característica, porque afirmações sempre implicam a negação de uma outra coisa. Pare para pensar nele e ele já voou” (Santaella, 1983, pág. 45).

2.3.2 Secundidade

A secundidade é a categoria da comparação, do fato, da realidade e da experiência no espaço e tempo. É a “pedra no meio do caminho” como diria Carlos Drummond de Andrade, a matéria na qual se encarna a qualidade (primeiridade), é o céu (azul ou não), como lugar e tempo. É o elemento de reação a qualquer experiência, anterior à mediação de um pensamento articulado e posterior ao puro sentir.

“À secundidade pertencem experiências (por exemplo, comparações entre duas percepções), que são sempre dependentes do espaço e tempo e, portanto — como todos os eventos factuais e todos os objetos concretos singulares —, existem sob a forma da realidade” (Walther-Bense, 2000, pág. 2).

2.3.3 Terceiridade

Por fim, a terceiridade corresponde à mediação, ao hábito, à memória, à continuidade, à representação, à generalidade, ao crescimento, à necessidade. Por exemplo: o azul, puro e simples azul, é um primeiro. O céu, como lugar e tempo, onde se encarna o azul, é um segundo. A elaboração cognitiva, a idéia transmitida pela frase “azul no céu” ou “azul do céu” é um terceiro.

“Mas a mais simples idéia de terceiridade é aquela de um signo ou representação. E esta diz respeito ao modo, o mais proeminente, com que nós, seres simbólicos,

estamos postos no mundo. Diante de qualquer fenômeno, isto é, para conhecer e compreender qualquer coisa, a consciência produz um signo, ou seja, um pensamento como mediação irrecusável entre nós e os fenômenos” (Santaella, 1983, pág. 51).

É justamente a terceira categoria fenomenológica que irá corresponder à definição de signo genuíno. Peirce definiu a relação triádica do signo como sendo aquela própria da ação do signo (semiose), ou seja, a de gerar ou produzir e se desenvolver num outro signo, este chamado de “interpretante do primeiro”, e assim *ad infinitum*, conforme veremos mais adiante. Segundo Peirce,

“Na sua forma genuína, terciridade é uma relação triádica que existe entre um signo, seu objeto e o pensamento interpretante, ele próprio um signo, considerado como constituindo o modo de ser de um signo [...] Um Terceiro é algo que traz um Primeiro para uma relação com um Segundo” (CP 8.332 apud Santaella, 2000c).

É importante ressaltar ainda as relações de interdependência entre as três categorias. Um Terceiro (necessidade) pressupõe um Segundo (realidade) e um Primeiro (possibilidade). Um Segundo pressupõe um Primeiro, e o Primeiro é livre (justamente sua principal característica). Peirce também demonstrou que qualquer relação poliádica pode ser reduzida a estas três categorias, mas que as relações triádicas, diádicas e monádicas não se deixam reduzir.

2.4 Signo e Semiose

Antes de continuar com os desdobramentos e conseqüências da classificação triádica dos fenômenos, há alguns aspectos que devem ser observados, a fim de facilitar a compreensão da semiótica peirceana.

Em primeiro lugar, é preciso estar preparado e aberto ao alto grau de abstração dos conceitos desenvolvidos por Peirce. A semiótica peirceana está baseada em uma lógica triádica que não pode ser reduzida a relações diádicas, com as quais estamos mais familiarizados. É preciso também livrar-se de idéias simplistas e pré concebidas do que seja signo. Ao contrário do que possa parecer, simplificações do tipo: “O signo é algo que significa alguma coisa para alguém” não ajudam na compreensão do signo, antes, limitam a capacidade de entender o conceito na sua amplitude e genericidade.

A noção de signo deve ser compreendida abstratamente, logicamente, antes de se analisar sua aplicação a signos atuais, que efetivamente ocorrem no cotidiano. Portanto, é importante fugir

da tentação de atualizar ou exemplificar os conceitos precipitadamente. Todo esforço deve ser feito no sentido de entender os processos lógicos que estão sendo apresentados, uma vez que, na semiótica peirceana, o importante, o que está sendo evidenciado, é o *modus operandi* dos elementos envolvidos.

O que buscamos não é apenas uma definição para os termos signo, objeto e interpretante. O importante é o *engendramento lógico entre estes três correlatos*, ou seja, a relação de representação vista como a forma ordenada de um processo lógico. Tanto é assim que, numa relação triádica genuína, não só o signo, mas também o objeto e o interpretante são signos. Ou seja, todos os três correlatos são signos. O que os diferencia é o papel lógico desempenhado por cada um deles na ordem de uma relação de três lugares.

Os conceitos de signo, objeto e interpretante estão intimamente ligados por uma lógica de determinação e representação, de tal forma que quando falamos em signo, estamos automaticamente falando em objeto e interpretante, pois o signo inclui o objeto e o interpretante. Nenhum signo pode funcionar como tal sem o objeto e o interpretante. Faz parte da natureza do signo, da relação triádica genuína, que ela tenha o poder de gerar um interpretante que, por sua vez, é também um signo para outro interpretante, com relação ao mesmo objeto, e assim sucessivamente, *ad infinitum*. Qualquer interrupção no processo degenera o caráter significante perfeito do signo. Essa relação triádica não cresce infinitamente apenas do lado do interpretante, mas também regride ao infinito, do lado do objeto, ou seja, não há um objeto originário na semiose, a não ser no campo ideal, inatingível.

À continuidade infinita da relação triádica, ou seja, à geração de sucessivos signos-interpretantes, damos o nome de *semiose ilimitada*. A semiose é um processo que ocorre necessariamente no tempo. Não existe semiose sem tempo. O objeto originário da semiose (imaginável mas inatingível) está na realidade, no passado. O interpretante último (também apenas imaginável, pois seria o fim da seqüência infinita de signos-interpretantes) está no futuro, representando a verdade e guiando o processo de semiose. A realidade causa o início da semiose, que caminha em direção à verdade. O signo está sempre no presente, representando parcialmente o objeto e gerando assim um interpretante que está um passo à frente, em direção ao futuro, rumo à verdade.

2.4.1 O Início da Semiose

Conforme afirmamos anteriormente, nenhum signo atualizado pode ser tomado como exemplo do signo genuíno, abstrato. Queremos porém apresentar um exemplo que visa demonstrar o contexto

no qual os fenômenos ocorrem e são interpretados, ou seja, o início da semiose do ponto de vista prático e cotidiano. Para tanto, imaginemos um robô, dotado apenas de sensores infravermelhos, que deve se mover numa sala cheia de obstáculos, sem tocá-los.

Analisando a situação *do ponto de vista do robô*, observamos que há algo que está fora do robô, que existe independentemente dele: é o que chamamos de ambiente ou mundo real (é a sala com os obstáculos). Esse ambiente só pode ser captado parcialmente pelo robô, através dos seus sensores infravermelhos. Há vários aspectos do ambiente que o robô não consegue captar, o que não significa que eles não existam, apenas não são perceptíveis ao robô.

O ambiente externo atua sobre os sensores do robô e faz com que estes gerem sinais. Estes sinais são a representação do ambiente dadas as limitações sensoriais, ou seja, são os objetos, estados e condições do ambiente tais como os sensores infravermelhos os conseguem captar. São tudo o que o robô consegue perceber do ambiente num determinado instante.

Para mover-se sem tocar nos obstáculos, o robô terá necessariamente que interpretar esses sinais. No momento em que o fizer, os sinais estarão funcionando como signos, e se dará início à semiose com a geração de sucessivos interpretantes que, no caso particular de um robô, não se estenderá *ad infinitum*, mas será interrompida quando o significado do signo tiver se desenvolvido suficientemente de acordo com critérios do próprio robô.

O objetivo é mostrar aonde “começa” o signo, a partir dos fenômenos, do ponto de vista do robô. Em primeiro lugar há os fenômenos, que estão fora, não fazem parte do signo, mas são sua causa, determinam o signo. Depois há aquilo que pode ser captado dos fenômenos, dadas as restrições sensoriais. Essa coisa captada (os sinais) é o que se pode perceber do fenômeno que ocorreu, e tem o potencial de ser um signo. Mas será signo somente quando gerar um interpretante, quando o intérprete (o robô) utilizar essa coisa como signo. Em resumo: há o ambiente externo, há os sinais, que são a parte perceptível do ambiente, e há a cadeia de signos-interpretantes formada a partir desses sinais.

2.4.2 O Signo

“Um Representâmen é o primeiro correlato de uma relação triádica, o Segundo Correlato sendo chamado de seu Objeto, e o possível Terceiro Correlato, chamado de seu Interpretante, por cuja relação triádica o possível Interpretante é determinado como sendo o Primeiro Correlato da mesma relação triádica para o mesmo Objeto e para algum possível Interpretante” (CP 2.242 apud Santaella, 2000c).

Há uma certa confusão entre os termos *representâmen* e *signo*. Embora sejam muitas vezes utilizados como sinônimos, até mesmo por Peirce, *representâmen* não é a mesma coisa que *signo*. Um *signo* é um *representâmen* com um interpretante mental. Ou ainda: “Em particular, todos os signos transmitem noções para as mentes humanas; mas não conheço nenhuma razão por que todo *representâmen* deveria fazer isso” (CP 1.540). Essa diferenciação explicita o caráter geral da semiótica peirceana, e a preocupação de Peirce em desvinculá-la da necessidade de interpretação por uma mente humana.

É importante neste momento novamente chamar a atenção ao fato de que estamos tratando aqui do *signo genuíno*, *abstrato*, não *corporificado* nem *interpretado* por nenhuma mente em particular.

“...deve-se considerar que a definição do signo em abstrato não diz respeito a um signo quando atualizado, visto que, quando se trata de um signo atual, concretamente manifesto, este vem sempre com misturas de caracteres icônicos, indiciais e simbólicos. Nenhum signo atual aparece em estado puro” (Santaella, 2000c, pág. 27).

Os signos de que efetivamente fazemos uso são, na verdade, signos degenerados (entenda-se degenerado no sentido de incompleto, e não no sentido pejorativo). Para compreender os signos degenerados, é preciso primeiro compreender o *signo genuíno*, a *lógica de funcionamento do signo*. Ao contrário do que possa parecer, uma explicação partindo de signos atuais (índices, ícones e símbolos, por exemplo) só faz dificultar a compreensão da semiótica genuína. Ela deve primeiro ser compreendida de maneira abstrata, para só depois ser atualizada, exemplificada, e compreendida na sua forma degenerada.

2.4.2.1 O Fundamento do Signo

Segundo Peirce, o *Signo* é o primeiro relato da relação triádica. O fato de ele ser o primeiro, nos leva diretamente à idéia de qualidade e possibilidade, que caracteriza a primeira categoria fenomenológica (primeiridade). Mas não se pode identificar a noção de *signo* simplesmente com a idéia de qualidade, pois a noção de representação expressa pela tríade semiótica só é introduzida na terceira categoria fenomenológica (terceiridade) que, por sua vez, corresponde exatamente à noção de *signo* como relação triádica.

“...a noção de signo já é, por natureza, triádica, isto é, só se define na tríade, não podendo, portanto, ser identificada meramente com a primeira categoria ou categoria de qualidade” (Santaella, 2000c).

Para entender a questão da primeira categoria (a da qualidade) com a noção de signo como primeiro relato da relação triádica, temos que distinguir entre o *primeiro termo da relação* e aquilo que *desempenha o papel de primeiro termo dessa relação*. Qualquer coisa que seja, pode ser um signo, isto é, pode desempenhar o papel de signo. Mas para isso deve ter uma característica, uma *qualidade*, em virtude da qual possa desempenhar o papel de signo. É essa qualidade que constitui a razão pela qual algo pode ser tomado como um signo, embora ele não seja um signo enquanto não for interpretado como tal. Essa qualidade ou característica é que é o primeiro termo da relação triádica.

De outra forma, podemos dizer que, para que algo seja um signo, deve gerar um interpretante (terceiridade), mas a capacidade de ser signo é intrínseca ao signo e se deve a uma qualidade (primeiridade) com respeito à qual o signo se relaciona com seu objeto (secundidade). Esta possibilidade de ser signo existe independentemente de o signo gerar ou não um interpretante, e pode ser identificada com a primeira categoria fenomenológica. Assim, a primeira categoria, pode ser identificada com a noção de um signo no sentido de *posse de potencialidade signica*, mas não é equivalente à noção de signo atual. Isto certamente ficará mais claro quando abordarmos os diferentes tipos de interpretante, mais adiante.

2.4.2.2 O Signo e seu Objeto

O signo é o mediador entre o objeto e o interpretante, levando este a ter uma relação com o objeto semelhante àquela que o signo tem, de forma que, por mais que a cadeia semiótica se expanda, em signos-interpretantes gerando signos-interpretantes, a relação com o objeto nunca é perdida, uma vez que o objeto é justamente aquilo que existe e resiste na semiose ou ação do signo. O fato de o signo ser determinado pelo objeto pode nos levar a pensar que o objeto deveria ser um primeiro, e o signo um segundo.

“Mas na forma ordenada do processo triádico, o objeto é um segundo em relação ao signo, que é um primeiro. Primazia “real”, portanto, não se confunde com primazia lógica, visto que, embora o signo seja determinado pelo objeto, este, por sua vez, só é logicamente acessível pela mediação do signo” (Santaella, 2000c, pág. 25).

Devemos atentar para o fato de que o signo não pode substituir o objeto, visto que nunca o representa completamente. Há sempre uma sobra do objeto que o signo não pode representar, pelo simples fato de que o objeto é um outro diferente dele. Por isso o signo é determinado pelo objeto e não simplesmente o substitui.

“Em síntese: o signo determina o interpretante, mas ele o determina como uma determinação do objeto. O interpretante, como tal, é determinado pelo objeto somente na medida em que o interpretante, ele próprio, é determinado pelo signo” (Santaella, 2000c, pág. 25).

Como podemos ver, a ligação do signo ao objeto se dá sob algum aspecto ou qualidade, não todos os aspectos, porque aí seria o próprio objeto e não mais um signo. Assim o signo está sempre em débito para com o objeto e, desta incompletude, vem a tendência de o signo se desenvolver num interpretante onde busca se completar. Contudo, o interpretante é também de natureza sógnica, e, portanto, também ficará em débito para com o objeto. Por manter sempre aspectos não representados no signo, é que o objeto determina a causação lógica dos interpretantes.

“Enfim, são apenas as circunstâncias práticas da vida ou os limites impostos no pensamento por uma determinada historicidade que nos levam a tomar um dado interpretante como sendo completamente revelador do objeto do signo. O longo curso do tempo (the long run, diria Peirce) sempre demonstrará que aquilo que foi tomado como completo não passava de apenas um dos aspectos parciais do objeto, visto que este, na sua inteireza ou totalidade, não pode ser capturado nas malhas dos signos. Por mais que a cadeia sógnica cresça, o objeto é aquilo que nela sempre volta a insistir porque resiste na sua diversidade” (Santaella, 2000c, pág. 31).

2.4.3 O Objeto

O objeto — que determina o signo ao mesmo tempo que é aquilo que o signo representa — não pode se restringir à noção de um existente ou objeto real. Não podemos confundir objeto com “coisa”. A noção peirceana de objeto é muito mais ampla.

“Os Objetos — pois um Signo pode ter qualquer número deles — podem ser uma coisa singular existente e conhecida ou coisa que se acredita ter anteriormente existido ou coisa que se espera venha a existir ou uma coleção dessas coisas ou uma qualidade ou uma relação ou fato conhecido cujo Objeto singular pode ser uma coleção ou conjunto de partes ou pode revestir algum outro modo de ser, tal como algum ato permitido, cujo ser não impede que sua negação seja igualmente verdadeira ou algo de natureza geral, desejado, exigido ou invariavelmente encontrado sob certas circunstâncias comuns” (CP 2.232 apud Santaella, 2000c, pág. 34).

Como já vimos, o signo intenta representar pelo menos uma parte do objeto que é, portanto, causa ou determinante do signo. O interpretante, como criatura gerada pelo signo, não pode

representar outra parte ou qualidade do objeto, que não aquela representada pelo signo. Por isso, para que a mente interpretadora — mente como qualquer coisa onde o signo se manifesta — tenha um conhecimento mais completo do objeto do signo, é necessário que tenha uma certa intimidade prévia com aquilo que o signo denota. A essa intimidade ou conhecimento prévios damos o nome de “experiência colateral”.

A experiência colateral é algo que está fora do signo e, portanto, fora do interpretante que o signo determina. É um conhecimento que o intérprete já tem sobre o objeto do signo e que não é devido a este signo em particular. Este conhecimento “extra-signo” é indispensável para que o signo possa funcionar como tal. Todo signo precisa estar de alguma forma relacionado com um contexto, que é criado pela experiência colateral.

“[...] Contudo, se houver alguma coisa que veicule informação e, apesar disso, não tenha absolutamente relação nem faça referência a algo com o qual a pessoa a quem a informação é transmitida tenha a menor familiaridade, direta ou indireta, quando recebe a informação — informação que seria de uma espécie estranhíssima —, o veículo desse tipo de informação não será, nesse contexto, denominado Signo” (CP 2.231 apud Santaella, 2000c, pág. 35)

2.4.3.1 Dois tipos de Objetos

Feitas estas considerações, dediquemo-nos aos dois tipos de objeto identificados por Peirce: o objeto imediato e o objeto dinâmico.

“Resta observar que normalmente há dois tipos de Objetos [...]. Isto é, temos de distinguir o Objeto Imediato, que é o Objeto tal como o próprio Signo o representa e cujo Ser depende assim de sua representação no Signo, e o Objeto Dinâmico, que é a Realidade que, de alguma forma, realiza a atribuição do Signo à sua Representação” (CP 4.536 apud Santaella, 2000c, pág. 38).

O objeto imediato é aquele que está dentro do signo, é uma sugestão que indica o objeto dinâmico, é a maneira como o objeto dinâmico está representado dentro do signo ou é apresentado por este, é o objeto como o signo permite que o conheçamos.

O objeto dinâmico é aquele que está fora do signo, que determina o signo, mas que só pode ser indicado parcialmente pelo signo, deixando que o intérprete o descubra por experiência colateral. Não temos acesso ao objeto dinâmico. Ele é a referência última, aquilo a que o signo se aplica e

que sempre pode ser investigado mais a fundo. Ele é idealmente imaginável, mas inatingível. A partir deste ponto fica claro por que Peirce disse que o objeto do signo é também um signo, pois o objeto do signo é o objeto imediato, que é uma representação do objeto dinâmico, e, portanto, um signo.

“Revendo: aquilo que provoca o signo é chamado de “objeto” (para sermos agora mais precisos: objeto dinâmico). O signo é determinado por alguma espécie de correspondência com esse objeto. Ora, a primeira representação mental (e, portanto, já signo) dessa correspondência, ou seja, daquilo que o signo indica, é denominada objeto imediato. Este objeto (representação mental) produz triadicamente o efeito pretendido do signo (isto é, seu interpretante) através de um outro signo mental. Essa natureza triádica da ação é essencial para que o signo funcione como tal” (Santaella, 2000c, pág. 40).

Todo objeto dinâmico de um signo genuíno, de um signo de lei, regride ao infinito. Só o objeto dinâmico como ocorrência pode ser delimitado, visto que se trata de uma coisa existente, num determinado lugar no tempo e no espaço. O que não quer dizer que tenhamos acesso direto a esse objeto, sem mediações. Ele sempre será mediado pelos perceptos, pelos sentidos. Para tornar mais clara a necessidade da diferenciação entre objeto dinâmico e imediato, basta refletirmos, por exemplo, sobre o objeto dinâmico indicado pela palavra “luz” a dois séculos atrás e o objeto dinâmico que ela indica hoje, no contexto das teorias físicas contemporâneas (Santaella, 2000c, pág. 43).

Com a distinção entre objeto dinâmico e imediato, Peirce quis mostrar que os signos se expandem, estão em constante crescimento, e embora cresçam, nunca se pode determinar a identidade entre o objeto imediato e o dinâmico. Nas semioses efetivas, atuais, estamos sempre no nível do objeto imediato, que constitui aquilo que o signo pode tornar conhecido de seu objeto dinâmico, num determinado momento no espaço e tempo.

2.4.3.2 Objeto e Percepção

Para entender como o objeto dinâmico pode participar da semiose estando fora do signo, ou seja, como pode determinar o signo se está fora do signo, temos que passar obrigatoriamente pela percepção, que é a porta de entrada dos signos à mente intérprete. Peirce chegou a um esquema triádico (como não poderia deixar de ser) que determina três ingredientes, interdependentes mas irreduzíveis, de toda e qualquer percepção: o percepto, o *percipuum* e o julgamento perceptivo.

Quando percebemos algo, há algo que está fora e se apresenta a nós, força-se sobre nós, independente da nossa vontade e além do nosso controle. Este primeiro ingrediente é o percepto.

“[...] há um elemento de compulsão e insistência inteiramente irracional na percepção que corresponde à teimosia com que o percepto resiste na sua singularidade, compelindo-nos a atentar para ele. É algo que está fora de nós e de nosso controle. Podemos, por exemplo, virar a cabeça e fechar os olhos para nos livrarmos de um golpe de luz que nos ofusca. Não obstante, essa luz continua lá, insistente, pronta a nos invadir novamente, tão logo voltemos a cabeça. O percepto é apenas esse elemento de insistência, [...]” (Santaella, 2000c, pág. 51).

Mas não podemos dizer nada sobre o que está fora de maneira isolada. O percepto só pode ser compreendido no contexto de esquemas interpretativos internos, ou seja, através do julgamento perceptivo. É o julgamento perceptivo que nos diz o que estamos percebendo quando focalizamos nossa atenção sobre o percepto. Por isso, Peirce afirma que os julgamentos perceptivos “são tanto indubitáveis quanto falíveis”. Exemplificando: você olha rapidamente para o céu e pensa ter visto uma estrela. Não há dúvida, naquele momento, de que você viu uma estrela. Se você tirar os olhos do céu e focalizar a atenção em outra coisa, terá guardado a sensação de ter visto uma estrela e esta sensação será indubitável. Mas suponha que tenha continuado a olhar para o céu e se dá conta de que a estrela está se movimentando. O julgamento perceptivo anterior é imediatamente corrigido num outro julgamento perceptivo, que diz que não é uma estrela, mas sim um avião (Santaella, 2000c, pág. 54).

“Embora o percepto, em si, seja mudo e nada professe (só sabemos dele através do julgamento de percepção), ele insiste na sua singularidade, determinando o julgamento de percepção. Embora este seja indubitável, ele pode ser falso, mas também ser corrigido, porque o percepto insiste, exercendo sua influência sobre o julgamento de percepção. Um julgamento de percepção destituído da certeza e da compulsão, que são próprias da percepção, constitui-se numa inferência abdutiva” (Santaella, 2000c, pág. 55).

Resta então saber qual a posição do *percipuum* na tríade perceptiva. Vejamos como Peirce coloca esta questão:

“Nada podemos saber sobre o percepto a não ser pelo testemunho do julgamento de percepção, exceto o fato de que nós sentimos o golpe do percepto, a reação dele contra nós, assim como vemos os conteúdos dele arranjados num objeto, na sua totalidade

— *excetuando-se também, certamente o que os psicólogos são capazes de extrair inferencialmente. Mas, no momento em que fixamos nossa mente sobre ele e pensamos sobre o menor detalhe dele, é o julgamento perceptivo que nos diz o que nós assim percebemos. Por esta e outras razões, proponho considerar o percepto, tal como ele é imediatamente interpretado no julgamento de percepção, sob o nome de “percipuum”. (CP 7.643 apud Santaella, 2000c, pág. 51).*

Ou seja, o *percipuum* é aquilo em que o percepto se converte assim que atinge nossos sentidos, antes mesmo de ser interpretado por qualquer julgamento de percepção. É o percepto tal como ele aparece, traduzido na forma e de acordo com os limites que os nossos sentidos lhe impõem.

Ao analisarmos os ingredientes da percepção à luz da tríade semiótica, podemos facilmente identificar o percepto no papel de objeto dinâmico, o *percipuum* no papel de objeto imediato, e o julgamento perceptivo no papel de signo-interpretante. Finalmente podemos unir objeto e percepção e partir para o terceiro elemento do signo: o interpretante.

“[...] Para todos os signos cujos intérpretes são seres humanos, os objetos imediatos destes signos são dinâmicos, tais como são inicialmente apreendidos no “percipuum”. O objeto imediato é o dinâmico tal como o “percipuum” o apresenta. Nessa medida, o objeto imediato é o dinâmico tal como ele se torna presente, por meio do signo, à mente que interpreta o signo daquele objeto. Vem daí a afirmação peirceana de que por intermédio da apreensão do signo apreendemos concomitantemente algo que não é signo, ou seja, seu objeto.

O “percipuum” do signo, seu objeto imediato, é simultaneamente o modo como o signo torna o objeto dinâmico disponível. Conclusão: todo “percipuum” já tem a natureza de um quase signo, pois o “percipuum” diz respeito à apreensão do signo tal como ele torna apreensível seu objeto dinâmico. Ora, esta apreensão deve ser considerada à parte de qualquer manifestação crítica ou interpretação. O julgamento crítico é uma função do interpretante do signo, enquanto que o objeto imediato e, mais ainda, o objeto dinâmico devem ser considerados como condições pressupostas para a interpretação. Com isto, chegamos ao ponto que nos leva diretamente à questão do interpretante” (Santaella, 2000c, pág. 59–60).

2.4.4 O Interpretante

Antes de mais nada queremos atentar para um equívoco que muitas vezes ocorre: o de confundir interpretante com intérprete ou interpretação. Interpretante, intérprete e interpretação não são, de forma alguma, sinônimos. O termo interpretante tem um significado técnico preciso, definido

dentro da tríade semiótica. Isso deve estar claro para que possamos compreendê-lo. O ato de interpretação de um signo consiste na atenção, na observação do interpretante ou interpretantes que o signo é capaz de produzir.

A relação entre signo e interpretante é a seguinte: o signo deve afetar uma mente (real ou potencial) de forma a criar algo nessa mente, chamado de seu interpretante. Isso ocorre não porque o signo seja um ente auto-suficiente, mas porque carrega o poder de receber a determinação do objeto. Desta forma, embora o intérprete e o ato interpretativo façam parte da relação semiótica, não se confundem com o interpretante.

Outra causa de confusão provém da idéia de que a existência do interpretante está condicionada a uma mente humana. É bem verdade que Peirce afirma em algumas de suas definições que “o interpretante é o efeito do signo sobre uma pessoa”, mas ele o faz apenas como uma simplificação, na tentativa de fazer-se compreender. Na verdade, o que Peirce quer evidenciar é o fato de que o interpretante não é o resultado de uma atividade subjetiva, mas sim uma consequência, uma determinação do signo. O signo é capaz de criar um interpretante devido ao poder próprio que tem — que lhe é dado por representar o objeto — independentemente de o interpretante ser efetivamente criado numa mente, ou de ocorrer o ato interpretativo. O interpretante é parte do signo, é uma consequência do signo como tal.

Ao mesmo tempo em que o interpretante faz parte do signo, ele é também um outro signo para algum possível interpretante, com relação ao mesmo objeto. Ou melhor, o interpretante é também um signo que, por sua vez, vai gerar outro interpretante e assim *ad infinitum*, de forma que todo interpretante é um signo para um interpretante posterior, bem como todo signo é também um interpretante, para algum signo anterior. Não há aí nenhuma circularidade na definição. Conforme já dissemos, na semiose genuína, objeto, signo e interpretante são de natureza sígnica. O importante, o que define o que é um signo, um objeto e um interpretante, são as relações de implicação e determinação entre esses elementos.

“Numa semiose genuína, esses três elementos têm natureza sígnica. O primeiro chama-se signo porque representa o objeto; o segundo se chama objeto porque determina o signo; o terceiro se chama interpretante porque é determinado imediatamente pelo signo e mediadamente pelo objeto” (Santaella, 2000c, pág.66).

Somente quando os três elementos forem de natureza sígnica é que a relação é genuína e portanto tende ao infinito tanto do lado do objeto quanto do lado do interpretante, conforme podemos ver na seguinte formulação de Peirce:

“A idéia mais simples de terceiridade dotada de interesse filosófico é a idéia de um signo ou representação. Um signo “representa” algo para a idéia que provoca ou modifica. Ou assim é um veículo que comunica à mente algo do exterior. O “representado” é seu objeto; o comunicado, a significação; a idéia que provoca, o seu interpretante. O objeto da representação é uma representação que a primeira representação interpreta. Pode conceber-se que uma série sem fim de representações, cada uma delas representando a anterior, encontre um objeto absoluto como limite. A significação de uma representação é outra representação. Consiste, de fato, na representação despida de roupagens irrelevantes; mas nunca se conseguirá despi-la por completo; muda-se apenas por roupa mais diáfana. Lidamos, apenas, então, com uma regressão infinita. Finalmente, o interpretante é outra representação a cujas mãos passa o facho da verdade; e como representação também possui interpretante. Eis aí uma nova série infinita” (CP 1.339 apud Santaella, 2000c, pág. 66).

2.4.4.1 As Divisões do Interpretante

As divisões do interpretante têm sido um dos focos de maior controvérsia e discussão entre os investigadores de Peirce. Naturalmente não está nos nossos objetivos entrar nessa discussão, e por isso optamos por nos aprofundar na divisão mais conhecida do interpretante, que é aquela baseada na fenomenologia, correspondendo à divisão do interpretante em três classes: o interpretante imediato (primeiridade), dinâmico (secundidade) e final (terceiridade). Esta divisão não diz respeito a diferentes tipos de interpretante, mas sim aos estágios pelos quais o interpretante passa até se converter em outro signo, são graus ou níveis do interpretante, ou melhor, diferentes aspectos ou estágios na geração do interpretante.

Novamente é importante atentar para o fato de que estamos tratando dos níveis do interpretante do signo triádico genuíno, que é genuíno justamente porque nele o interpretante passa por todos os estágios (ou graus) rumo ao interpretante final. Só depois é que trataremos da ação dos interpretantes nos signos degenerados, nos quase-signos. Nestes, a trajetória do interpretante não se completa rumo à continuidade, mas é interrompida em algum ponto, que consideramos suficiente para preencher a função que o signo deve cumprir.

“(O interpretante imediato) é o efeito inanalizado total que se calcula que um signo produzirá ou naturalmente poderia se esperar que produzisse, o efeito que o signo produz primeiro ou pode produzir sobre uma mente, sem nenhuma reflexão sobre ele mesmo” (Nöth, 1998, pág. 74).

O interpretante imediato é aquilo que o signo está apto a produzir numa mente inter-

pretadora qualquer, antes de atingir essa mente, é a interpretabilidade do signo em função de sua estrutura interna. É uma possibilidade de sentido ainda não atualizada, potencial ainda não realizado que está contido no próprio signo, antes de atingir um intérprete em particular. É o interpretante no seu estado de imediato, sem mediação e análise. É a impressão total inanalizada que se espera que o signo possa produzir, antes de haver qualquer reflexão crítica sobre ele.

“O interpretante Dinâmico é qualquer interpretação que qualquer mente realmente faz do Signo. Este interpretante deriva seu caráter da categoria diádica, a categoria da ação [...] O significado de qualquer Signo sobre alguém consiste no modo como esse alguém reage ao Signo” (CP 8.315 apud Santaella, 2000c, pág. 73).

O interpretante dinâmico é o que apresenta menos problemas de compreensão. É o efeito efetivamente produzido pelo signo num ato de interpretação concreto e singular, é o interpretante gerado pelo signo numa determinada mente, num determinado lugar no tempo e espaço. É o interpretante do signo que realmente ocorre, dando prosseguimento ao signo que o determina. De acordo com Santaella (1992), há três níveis de interpretante dinâmico que podem ser produzidos: o emocional, que vai desde uma mera qualidade de sentimento, vaga e indefinível, até uma emoção codificada: é o sentimento provocado pelo signo. O segundo nível é o energético, que é o esforço de ação física ou psíquica, resultante do embate entre o signo e a mente interpretadora. Sempre há um aspecto de combate e resistência quando um signo atinge uma mente. E o terceiro nível é o lógico, uma regra de interpretação, é o lado geral, coletivo, generalizado da interpretação, no qual o signo é interpretado de acordo com regras já internalizadas. Quando um signo novo e surpreendente aparece, precisamos gerar novos interpretantes lógicos para ele, e é nesse processo de criação que agem a abdução, indução e dedução, sobre as quais falaremos mais adiante.

“Meu interpretante Final é o resultado interpretativo ao qual todo intérprete está destinado a chegar se o Signo for suficientemente considerado [...] O interpretante Final é aquilo para o qual o real tende” (Hardwick, 1977 apud Santaella, 2000c, pág. 74).

Por fim, o interpretante final aparece como um limite ideal, aproximável, mas inatingível, para o qual os interpretantes dinâmicos tendem. É o interpretante ao qual chegaríamos se fosse possível atualizar todos os interpretantes de um signo. É a meta que o intérprete do signo busca alcançar a cada novo interpretante que gera, independentemente do fato de atingí-la ou não.

“Num sentido bem geral temos então que o objeto dinâmico equivaleria à realidade e o interpretante final à verdade. Se fosse possível o signo se desenvolver até o ponto

de chegar à realização do limite do seu potencial, teríamos a revelação perfeita do objeto dinâmico, quando haveria uma superposição entre o real e a verdade [...] Em semioses concretas, históricas, contudo, nós estamos sempre no meio do caminho, de forma que nunca temos condições de afirmar que um signo desenvolveu todo o seu potencial a ponto de ser capaz de representar todas as dimensões do objeto que o determina. Estamos pois, inelutavelmente, no meio do caminho de uma verdade sempre relativa, pela metade.

Assim sendo, na semiose ou ação do signo, que é a ação de gerar interpretantes, e que a definição do signo nos mostra como sendo a forma intrincada de um processo lógico, o real está na posição do objeto dinâmico e a verdade na posição do interpretante final. Isto é, o real está no passado e a verdade no futuro. O presente é o lugar do intérprete ou interpretante dinâmico. Se fosse possível atingir a verdade, ela coincidiria com o real, seria a revelação manifesta do real, ponto de encontro do passado com o futuro. Uma vez que o intérprete ocupa a posição lógica do presente, lugar de trânsito sógnico, ele está, portanto, sempre e inevitavelmente, no meio do caminho entre passado (real) e futuro (verdade). Nessa medida, o real é causa, aquilo que persiste, e a verdade é busca, aquilo que prossegue. O real persiste porque é aquilo que resiste ao signo e que, por resistir, determina o signo. A verdade prossegue porque quer ser real, mas só pode ser signo. A posição do intérprete, quando ele é movido pelo ideal ético, é a de estreitar, aproximar a brecha que separa o real da verdade. Para estreitar essa brecha, produzem-se signos. Os signos não se perdem na deriva porque o real constrange o signo ao chamamento da verdade. O intérprete não é necessariamente um indivíduo. Qualquer coisa que ocupe a posição lógica de tradutor do real em verdade, através do signo, é um intérprete. Note-se também que o erro faz parte da verdade, pois é esta que incita à correção do erro. A verdade, portanto, não brota de uma tabela prévia, nem é um fim fechado, pois o real cresce junto com os signos.

[...] O processo de geração do interpretante é o processo através do qual o significado se move [...]. Conforme o processo da semiose indica, o significado projeta-se para a frente, enquanto o real recua para trás. [...] Quanto mais cresce o signo em interpretantes, mais cresce o objeto dinâmico ou real. Devido à incompletude do signo, jamais poderemos afirmar que conhecemos o real inteiramente e que possuímos a verdade totalmente. Nós também somos signos e estamos incessantemente imersos nesse constante movimento de procura” (Santaella, 1992, pág. 191–92).

2.5 Tricotomias do Signo

A semiose genuína é um limite ideal, é abstrata, e não está presente no plano do real. Neste, só ocorrem misturas de signos genuínos com signos degenerados dos mais diversos tipos. As três

categorias de Peirce (primeiridade, secundidade e terceiridade), são os pontos de convergência que ele enxergou no emaranhado de signos existente na aparente heterogeneidade dos fenômenos do universo. O caráter triádico do signo deu origem às três grandes divisões mais exploradas: 1) do signo em si mesmo (quali-signo, sin-signo e legi-signo), 2) da relação do signo com seu objeto (ícone, índice e símbolo), e 3) da relação do signo com o interpretante (rema, dicente e argumento). As subdivisões destas três divisões, foram obtidas de acordo com as variações das categorias de primeiridade, secundidade e terceiridade. Nesta seção pretendemos examinar sucintamente estas tríades, a fim de que possamos mais adiante analisar como os signos se manifestam no agente neuroenergético. Antes porém convém ressaltar que

“todas tricotomias estabelecidas por Peirce não funcionam como categorias separadas de coisas excludentes, mas como modos coordenados e mutuamente compatíveis pelos quais algo pode ser identificado semioticamente. As três categorias que presidem as divisões triádicas são onipresentes, de modo que tudo e qualquer coisa pode ser um primeiro, tudo e qualquer coisa é um segundo e tudo e qualquer coisa deve ser um terceiro. Assim, o modo de ser de um signo depende do modo como esse signo é apreendido, isto é, do ponto de referência de quem o apreende” (Santaella, 2000c, pág. 96).

2.5.1 Signo em Si Mesmo

Quali-signo funciona como signo por intermédio de uma primeiridade da qualidade, uma qualidade pura e simples, sem localização espaço-temporal. Qualidades só podem ser transmitidas por quali-signos. É o caso do exemplo a ser imitado, da criança que aprende a imitar os pais, muito mais pela convivência do que pela transmissão de um receituário. O processo de educar é prioritariamente uma questão do quali-signo.

Sin-signo é o existente real, objeto da experiência direta. Nesse caso não é a qualidade em si que está funcionando como signo, mas sua ocorrência particular no tempo e espaço. É o grito de alerta que em determinado instante nos faz parar. Embora o som seja prioritariamente um quali-signo, e também haja leis convencionais associadas às palavras, é a ocorrência singular naquele instante, o sin-signo, que nos faz parar.

Legi-signo é uma lei ou caráter geral que rege o funcionamento sgnico do signo. O legi-signo age como uma força que tende a governar todas as ocorrências de interpretantes singulares. O poder de gerar interpretantes já está dentro do legi-signo, pouco importando se esses

interpretantes são efetivamente gerados. É o caso dos hieróglifos: sendo decifrados ou não, têm o poder de agir como signos.

2.5.2 Signo em Conexão com seu Objeto

Ícone é o signo que tem uma propriedade monádica (qualidade, primeiridade). Uma vez que a propriedade monádica é algo não relacional, a única relação possível que o ícone pode ter com seu objeto, é de ser idêntico ao objeto, indistingüível deste, com relação àquela propriedade. É o caso dos modelos, das metáforas, das imagens, etc. Mas talvez o aspecto mais importante do ícone, do ponto de vista da construção de sistemas inteligentes, é seu significado como algo que ainda não brotou na mente, algo vago e indefinido, com uma mera possibilidade de emergir, pouco antes de emergir. Santaella (2000c) propõem uma subdivisão do ícone, na qual chama de ícone puro

“[...] a possibilidade de algo originaliano, iniciante, nascente. É o ícone no seu aspecto monádico, responsável pelo que se costuma chamar de 'insight', mescla indissolúvel de instinto e razão, instinto para a verdade ou razão do instinto. O ícone como mônada é fruto de um potencial da mente para produzir configurações que não são copiadas de algo prévio, mas brotam sob o governo incontrolável das associações” (Santaella, 2000c, pág. 114).

Dada a relevância deste aspecto do ícone na compreensão dos processos de criação, e especialmente sua aplicação no agente neuroenergético, consideramos importante citar ainda um exemplo curioso fornecido por Peirce:

“Suponhamos que eu tenha estado muito tempo quebrando a cabeça com algum problema – digamos, como construir uma máquina de escrever realmente boa. Ora, há muitas idéias vagas na minha cabeça, e nenhuma delas, tomada em si mesma, tem qualquer analogia particular com meu grande problema. Mas um dia, todas essas idéias, todas presentes à consciência, mas ainda muito vagas e profundas na profundidade do pensamento subconsciente, têm a chance de se verem reunidas num modo particular tal que a combinação realmente apresenta uma forte analogia com a minha dificuldade. Essa combinação quase instantânea se ilumina na vividez. Ora, isto não pode ser contigüidade; pois que a combinação é, além do mais, uma idéia nova. Ela nunca tinha me ocorrido antes; e conseqüentemente não pode estar submetida a qualquer hábito adquirido. Deve ser, como parece ser, sua 'analogia' ou 'semelhança na forma', em relação ao nódulo do meu problema que a traz para a vividez. Bem, o que pode ser isso senão pura e fundamental associação por semelhança?” (CP 7.498 apud. Santaella, 2000c, pág. 112)

Índice é o signo que possui uma conexão direta com seu objeto, e por causa dessa vinculação direta, o objeto é um objeto ou acontecimento determinado, singular, individual, condicionado temporal e espacialmente. É só pelo uso de índices que podemos determinar se estamos lidando com o mundo real ou o mundo dos conceitos, ou o mundo das construções matemáticas. São índices: termômetros, olhares e entonação de voz de um falante, nomes próprios, etc.

Símbolo é, segundo Peirce, um signo que é signo independentemente de semelhanças ou vinculações diretas com seu objeto e que por isso designa esse objeto com inteira liberdade. É um tipo geral, e aquilo que representa também não é um individual, mas um geral. Ele constitui um signo pelo fato de que será usado e interpretado como tal. É o caso da palavra *mulher*, por exemplo. O objeto designado por ela não é esta nem aquela mulher, mas toda e qualquer mulher.

2.5.3 Signo como Representação para o Interpretante

Rema é um signo cujo interpretante é uma mera possibilidade, uma hipótese, que não pode ser julgada logicamente nem como verdadeira, nem como falsa. É o caso do predicado: "... é o amante de ...". Um signo que seja remático na referência ao interpretante pode ser icônico, indicial ou simbólico na referência ao objeto. É um *conceito* da lógica.

Dicente é o signo capaz de uma afirmação. Considerado logicamente, o dicente (a proposição) pode ser julgado, avaliado e decidido, como por exemplo na frase: "Joaquim é amante de Manuela". Todo signo dicente determina um juízo ou ação do intérprete, e informa algo sobre o objeto que nele está representado. É uma *proposição* da lógica.

Argumento ou inferência é um signo que é interpretado por seu Interpretante Final como um signo de lei, regra reguladora ou princípio guia, ou seja, é a lei segundo a qual "a passagem de todo o conjunto das premissas para as conclusões tende a ser verdadeira" (CP 2.203). É um *silogismo* da lógica. Peirce dividiu os argumentos em três tipos: abdutivos, dedutivos e indutivos, considerados como os três tipos possíveis de raciocínio, e assunto da próxima Seção deste trabalho.

2.6 Os Três Tipos de Raciocínio

Sempre que nos deparamos com fenômenos surpreendentes, buscamos por hipóteses que os expliquem, que os tornem uma consequência necessária ou provável dessa hipótese. Mas como são formadas ou escolhidas essas novas hipóteses? Existe uma lógica guiando o processo de criação de hipóteses?

Segundo Fann (1970), grande parte dos filósofos nega que exista uma lógica na proposição de uma hipótese. Para eles, só faz sentido preocupar-se com os métodos de testar hipóteses que já foram apresentadas. E são muitos os lógicos da ciência contemporânea que dedicaram-se a descrever como se criam razões para suportar uma hipótese proposta. Mas eles nada disseram sobre o contexto conceitual no qual essa hipótese é inicialmente proposta.

Se estamos, porém, interessados em criar sistemas inteligentes artificiais, essa perspectiva não é muito animadora, haja vista que um sistema inteligente deve ser capaz de reagir a situações novas, para as quais não foi especificamente programado. Mais, qualquer sistema com capacidade de aprendizado deve ser capaz de gerar novas hipóteses, e a compreensão da maneira pela qual nós, seres humanos, geramos hipóteses, poderia ser de grande ajuda na construção de tais sistemas.

Peirce mostrava-se impressionado pelo pequeno número de tentativas que o ser humano tem de fazer para gerar uma hipótese verdadeira, face às inúmeras hipóteses que poderiam ser geradas. Por isso ele não podia aceitar a idéia de casualidade ou mera probabilidade na proposição de hipóteses, e defendia a tese de que há uma lógica que guia todo o processo de raciocínio, desde a proposição até a confirmação de uma hipótese e de suas consequências.

“O ser humano tem uma certa capacidade de introspecção [...] para o interior da Terceiridade [...]. Esta capacidade é da natureza geral do Instinto, semelhante aos instintos dos animais, no seu poder de sobrepujar os poderes da nossa razão, e por nos direccionar como se estivéssemos de posse de fatos que estão completamente além do alcance dos nossos sentidos. Também se assemelha ao instinto em sua pequena propensão ao erro; pois embora ela erre com mais freqüência do que acerte, a freqüência de acertos em relação ao todo é a coisa mais maravilhosa de nossa constituição. (CP 5.173)”

Assim, Peirce concebeu três tipos de raciocínio como três estágios interconectados e interdependentes no processo de investigação científica: abdução, dedução e indução. Não é por acaso que os estágios são três. Eles estão diretamente associados às categorias fenomenológicas de Peirce

(Seção 2.3) no que diz respeito à ordem de sua interdependência no processo de raciocínio, sendo a abdução uma primeiridade, dedução uma secundidade e indução uma terceiridade (Santaella, 2000b). O processo de raciocínio tem início quando fatos surpreendentes emergem, requerendo uma explicação. De acordo com Peirce, esta

“explicação deve ser uma proposição tal que leve à predição dos fatos observados, se não como conseqüências necessárias, então ao menos como muito prováveis sob as circunstâncias. Uma hipótese deve então ser adotada, que seja plausível e torne os fatos plausíveis. Este passo de adoção de uma hipótese como sendo sugerida pelos fatos, é o que chamo de abdução (CP 7.202).

A abdução corresponde ao primeiro estágio da investigação científica, e ocupa-se com a geração original e recomendação de uma hipótese explanativa, isto é, com a proposição de leis específicas que justifiquem o fenômeno sob consideração. Segundo Peirce, a abdução é um processo inconsciente, fora do controle da razão, e tem “apenas” o papel de sugerir hipóteses.

“A primeira coisa que será feita, assim que uma hipótese tiver sido adotada, é seguir suas conseqüências experimentais necessárias ou prováveis. Este passo é a dedução. (CP 7.203)”

Neste segundo estágio da investigação, a hipótese proposta é analisada logicamente para ser melhor explicada, e as considerações introduzidas na explicação são utilizadas para derivar suas conseqüências experimentais (Shanahan, 1986). Uma vez que a dedução tenha avançado suficientemente,

“o próximo passo é o de testar a hipótese fazendo experimentos, e comparando as predições feitas a partir da hipótese com os resultados efetivos dos experimentos. Quando observamos que predição após predição é verificada experimentalmente, começamos a aceitar a hipótese como estando entre os resultados científicos” (Fann, 1970). “Este tipo de inferência, que experimentalmente testa predições feitas a partir de uma hipótese, é que pode ser chamado de indução” (CP 7.206).

“Observe que dedução e indução não têm a menor contribuição na conclusão final da investigação. Elas transformam o indefinido em definido; dedução explica; indução avalia; e isto é tudo. A abdução é a única operação lógica que introduz qualquer idéia nova” (CP 5.171).

A diferença entre abdução e indução foi definida mais precisamente da seguinte maneira:

“Indução não tem poder de adicionar qualquer informação ao conhecimento atual. No máximo ela pode corrigir o valor de uma justificativa ou modificar a hipótese levemente numa maneira que já havia sido considerada como possível. Abdução, por sua vez, é meramente preparatória. É o primeiro passo do raciocínio científico, enquanto indução é o último. Ambos representam polos opostos do raciocínio. Abdução é o polo menos efetivo, e indução o polo mais efetivo. Um é o reverso do outro. Abdução busca por uma teoria. Indução procura por fatos” (CP 7.217-18).

Segundo Peirce, a abdução é um “instinto racional”, ou seja, a introspecção que leva ao surgimento de uma nova hipótese, pertence à mesma classe geral de operações a que pertence o julgamento perceptivo. Para ele, abdução e julgamento perceptivo são exatamente similares até um certo ponto, a separação entre eles ocorrendo somente no final do processo. O resultado da abdução, que é a hipótese ou conjectura, está sujeito a críticas, enquanto seria absurdo criticar um julgamento perceptivo. Lembremos que o julgamento perceptivo é falível mas indubitável. Enquanto nossa mente está produzindo um julgamento perceptivo, e mesmo quando o recuperamos através da memória, somos psicologicamente incapazes de conceber que ele seja falso. Esse é o único aspecto em que a inferência abdutiva difere do julgamento perceptivo. Apesar do fato de ambos partirem do mesmo lugar, a hipótese resultante da abdução pede por aceitação crítica e por confirmação indutiva. Entretanto, na sua origem, ambos são idênticos, isto é, ambos são inferências *inconscientes*, fora de controle. Elas se forçam sobre nós e não podemos exercer controle sobre elas (Santaella, 2000a).

A natureza é um repertório de fatos muito mais vasto e muito menos claramente ordenado do que um relatório do censo; e se a humanidade não tivesse vindo a ela com aptidões especiais para adivinhar corretamente, teríamos tudo para duvidar se, nos dez ou vinte mil anos de sua existência, suas grandes mentes teriam sido capazes de chegar à quantidade de conhecimento que hoje qualquer idiota possui. [...] Todo conhecimento humano, até os mais altos píncaros da ciência, não é senão o desenvolvimento de nossos instintos animais inatos. É sempre a hipótese mais simples, no sentido de mais dócil e natural, aquela que o instinto sugere, aquela que deve ser preferida; a razão para isso é que, se o homem não tivesse uma inclinação natural em concordância com a natureza, ele não teria a menor chance de entendê-la” (CP 2.753-4)

2.7 Resumo

O intuito deste capítulo foi o de fornecer, através de uma introdução à Semiótica peirceana, ferramentas para uma melhor compreensão da maneira pela qual nós, seres humanos, processamos os fenômenos que se manifestam e por nós são percebidos, especialmente no que diz respeito à criatividade e capacidade de raciocínio, elementos tão desejados em sistemas artificiais. A seguir uma lista dos principais tópicos abordados no capítulo:

- Todo e qualquer fenômeno pode ser classificado em função das três categorias de primeiridade, secundidade e terceiridade.
- O signo é o exemplo mais perfeito de terceiridade, sendo ele um primeiro em relação ao interpretante que gera (este um terceiro), que por sua vez será um signo do mesmo objeto (um segundo) para com outro interpretante, numa semiose infinita.
- Os signos podem ser divididos de acordo com a categoria (primeiridade, secundidade, terceiridade) de cada um de seus componentes (signo, objeto, interpretante). Importante aqui é ressaltar o papel do ícone no processo criativo.
- Há somente três processos de raciocínio: a abdução gera ou propõe hipóteses, que são explicadas e ampliadas pela dedução, e comprovadas pela indução. É desta forma que Peirce define o método de investigação científica.

Capítulo 3

Conceito Neuroenergético de Inteligência

*Keep it simple:
as simple as possible,
but no simpler.*

(Albert Einstein)

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta, de maneira resumida, o projeto de um agente autônomo baseado em redes neurais neuroenergéticas, chamado de *agente neuroenergético*. A rede e o agente neuroenergético (que serão detalhados nos Capítulos 4 e 5, respectivamente) têm uma forte inspiração biológica, e foram inicialmente propostos pelo pesquisador russo Leonid B. Emelianov-Yaroslavsky em seu livro *‘Intellectual quasi-biological system (Inductive automaton)’* (Emelianov-Yaroslavsky, 1990). O livro está em língua russa, e não há tradução disponível, nem mesmo foi possível conseguir uma versão original do livro pois sua edição está esgotada. Felizmente o livro está integralmente publicado na internet¹, de onde foi traduzido para o inglês, página por página, com um tradutor automático². A qualidade da tradução deixa muito a desejar, mas com o auxílio de alguns artigos publicados em língua inglesa³, repetidas leituras e muitos experimentos, cremos ter alcançado o objetivo de compreender a proposta do agente neuroenergético.

¹<http://www.aha.ru/~pvad>

²<http://babelfish.altavista.com>

³A bibliografia em língua inglesa restringe-se a dois artigos publicados na revista *‘Biological Cybernetics’* (Emelianov-Yaroslavsky & Potapov, 1992a,b) e a um resumo do livro publicado na Internet (Emelianov-Yaroslavsky, 1992).

Ao que nossas pesquisas indicam, os trabalhos com o agente neuroenergético não tiveram continuidade após a morte do autor, de forma que trata-se de um sistema pouco divulgado e de difícil acesso. Por isso, e também devido à pouca bibliografia disponível, propusemo-nos a descrever o assunto de uma maneira bastante completa, ainda que um pouco extensa. Para tanto, dividimos o assunto em três partes: nesta primeira parte, fornecemos uma visão geral dos principais componentes e do funcionamento do agente neuroenergético, na segunda parte fazemos um estudo detalhado do neurônio e de como a rede neuroenergética se auto-organiza, mostrando inclusive resultados obtidos através de simulações computacionais, e na terceira parte discutimos como se dá a construção de um agente a partir das redes neuroenergéticas.

A inspiração biológica da rede neuroenergética, bem como a semelhança de seu funcionamento com o de sistemas biológicos, levou à adoção de um vocabulário similar ao utilizado quando nos referimos a seres vivos. Desta forma, o elemento básico da rede é o *neurônio*, que tem um estado de *saúde*, indicando que ele pode *morrer*, mas também *regenerar-se*. Da mesma maneira, a rede neuroenergética apresenta comportamentos ou padrões de atividade que chamamos de *sono*, *vigília*, e *subconsciência*. Mas em alguns casos em que consideramos a nomenclatura original inconveniente, esta foi alterada, para também condizer com os termos comumente utilizados pela comunidade de inteligência artificial. Os casos em que esta mudança ocorreu são observados nas notas de rodapé.

3.1.1 Organização do Capítulo

A seção 3.2 introduz o modelo de agente proposto por Emelyanov-Yaroslavsky. Nas Seções 3.3 e 3.4 apresentamos as principais características do neurônio e da rede neuroenergética. A Seção 3.5 explica de maneira geral o funcionamento da memória e do centro emocional, com suas conseqüências no aspecto de inteligência do agente, enquanto que as Seções 3.6 e 3.7 abordam duas maneiras de estender as possibilidades cognitivas do agente. Finalmente, apresentamos um resumo seqüencial do capítulo na Seção 3.8.

3.2 Um Modelo para o Agente Neuroenergético

O modelo de agente neuroenergético⁴ proposto por Emelyanov-Yaroslavsky ainda não foi implementado em sua totalidade nem pelo autor original, mas grande parte do seu funcionamento está

⁴Emelyanov-Yaroslavsky não utiliza o conceito de agente, mas chama-o de autômato.

descrito neste trabalho. O agente é composto basicamente por grupos de neurônios com função de receptores, atuadores, e controle da distribuição de energia, e por uma grande rede neuroenergética subdividida em memória e centro emocional ou centro de controle do agente, conforme ilustrado na Figura 3.1.

Os receptores recebem as ações do ambiente no qual o agente está inserido e convertem estas ações em ações neuronais. Os atuadores recebem ações dos neurônios e as convertem em ações no ambiente. Entende-se por ambiente o mundo real ou meio artificial com propriedades regulares no qual o agente está inserido. A memória é responsável por armazenar e representar as regularidades do ambiente, e o centro emocional guia o processo de aprendizado e tomada de decisões.

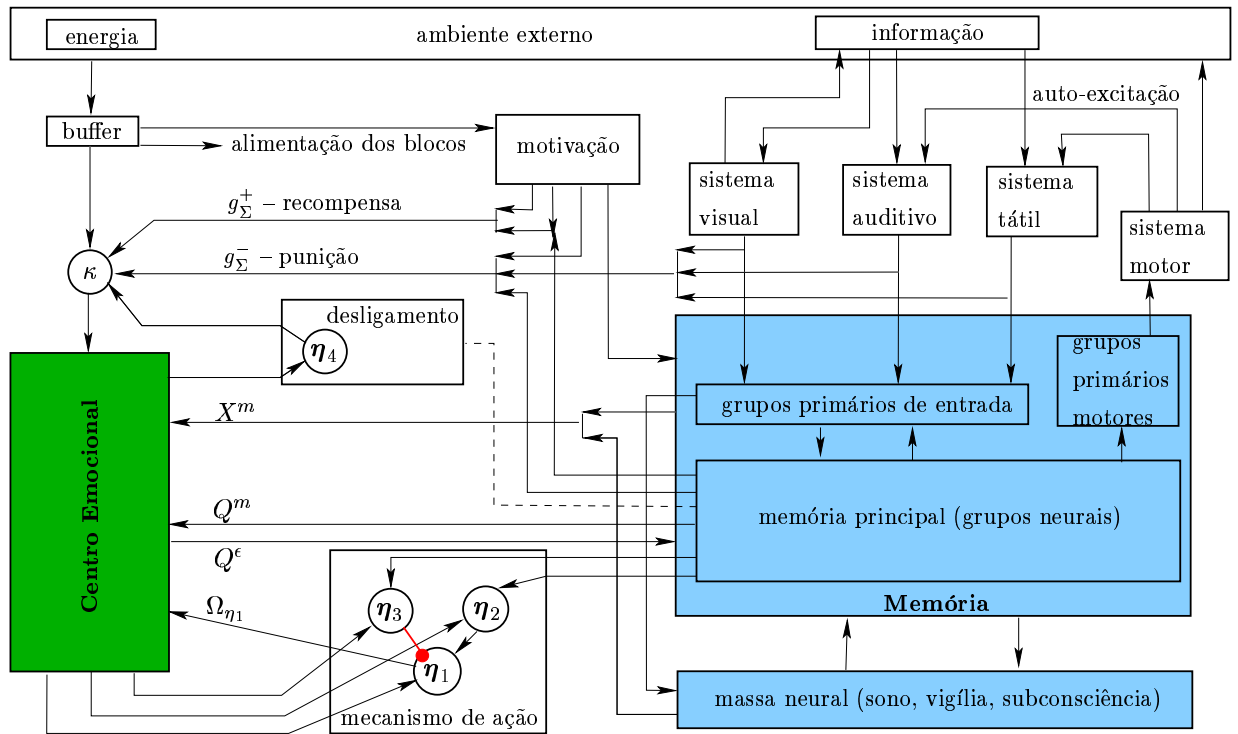


Figura 3.1: Modelo de um agente neuroenergético proposto por Emelyanov-Yaroslavsky. Destaque para o centro emocional (verde) e para a memória (azul)

Neste modelo, a energia é obtida diretamente do ambiente, e distribuída a todos os blocos do agente de maneira relativamente uniforme. Apenas o centro emocional possui um mecanismo de controle para a entrada de energia (κ), usado para punir ou incentivar determinadas ações e decisões.

Os sistemas visuais, auditivos e táteis são basicamente compostos por receptores (neurônios)

que estão conectados à memória. O sistema motor realiza ações no ambiente por meio de atuadores pré-definidos, e pode executar ações sobre si mesmo, através da ligação com o sistema auditivo (esta ação sobre si mesmo consiste no ato de “falar”, para em seguida “ouvir”, e é a base do sistema de auto-excitação).

Os componentes mais importantes do agente neuroenergético são a memória e o centro emocional. A memória forma-se a partir da separação de grupos neurais da massa neural, que é uma rede inicialmente desorganizada, na qual ocorrem os fenômenos auto-organizados de sono, vigília e subconsciência, abordados no decorrer do trabalho. No modelo apresentado, a memória foi subdividida em memória principal — composta pelos grupos neurais secundários formados a partir da massa neural — e os grupos de entrada e saída, contendo o “vocabulário” pré-definido do agente (grupos primários).

O centro emocional é a central de controle e tomada de decisões do agente. É formado por neurônios um pouco diferentes dos neurônios da memória, haja vista que não formam conexões entre si, e por isso dependem de excitações enviadas pela memória. O centro emocional reflete o estado de todo o agente, e opera em um regime cíclico com a memória, modulando sua atividade e sendo influenciado por ela.

3.3 O Neurônio

A base de todo o agente é um elemento de limiar dinâmico, com muitas propriedades semelhantes às do neurônio biológico, por isso chamado de neurônio neuroenergético, ou simplesmente, neurônio. É importante ressaltar que este neurônio é mais complexo do que os neurônios utilizados nas redes neurais artificiais tradicionais (e.g. *feed forward*, Kohonen, etc.). Seu principal parâmetro de saída é a frequência de geração de impulsos (v), que determina o estado do neurônio: descanso (ausência de impulsos), geração em baixa frequência e geração em alta frequência. Os impulsos gerados pelo neurônio não diferem entre si em quaisquer aspectos (intensidade, duração, etc.), a única variação ocorre na quantidade de impulsos gerados num determinado intervalo de tempo, ou seja, na frequência, que é justamente o parâmetro de saída do neurônio.

As principais propriedades do neurônio são:

1. O neurônio necessita de energia. Se ele não receber a quantidade necessária de energia do ambiente, então ele morre.

2. O neurônio degenera-se no estado de descanso ($v = 0$). O consumo de energia do neurônio depende de seu grau de degeneração (Θ). Quanto mais degenerado o neurônio estiver, maior será seu consumo de energia ($g_2(\Theta)$) (Figura 3.2 na próxima página).
3. O neurônio é capaz de realizar renovação funcional, o que leva à diminuição do consumo de energia. Essa renovação funcional ou regeneração é feita através da geração de impulsos, de forma que podemos afirmar que **o impulso no neurônio é necessário ao próprio neurônio, pois é um estado de intensa atividade regeneradora**. Para gerar impulsos, o potencial resultante (U) do neurônio precisa ultrapassar um limiar de excitabilidade (Π_0), que (simplicadamente) é inversamente proporcional ao grau de degeneração. Ou seja, quanto maior Θ , mais fácil se torna a geração de impulsos, pois menor é o limiar, conforme mostra a Figura 3.2 na página seguinte. Quando Θ ultrapassa um limite crítico Θ_c , Π_0 cai para valores muito baixos de forma que o neurônio é capaz de gerar impulsos espontaneamente, sem receber excitação externa.
4. A geração de impulsos também consome energia, e a quantidade de energia consumida ($g_1(v)$) depende da frequência de geração de impulsos. Existe uma frequência ótima v_{opt} para a qual o consumo é mínimo em relação à redução de Θ que proporciona, mas para poder gerar impulsos nesta frequência, os neurônios precisam interagir, haja vista que não conseguem atingir a frequência ótima isoladamente.
5. Os neurônios podem unir-se através de conexões que permitem a interação entre eles. Desta forma, impulsos de um neurônio podem auxiliar ou dificultar a geração de impulsos em outros neurônios (as conexões podem ser excitatórias ou inibitórias). É através das conexões que a interação entre os neurônios é organizada de forma a minimizar sua necessidade de energia. A conexão entre dois neurônios é fortalecida quando eles geram impulsos simultaneamente, aumentando o potencial excitatório que chega a ambos. Sob determinadas condições, que veremos mais adiante, uma conexão excitatória pode transformar-se em inibitória.
6. O neurônio tem uma reserva interna de energia (H), que é acumulada quando a oferta de energia é maior do que a necessidade do neurônio, e consumida na relação inversa. A *saúde*⁵ (Q) do neurônio é determinada pelo valor de H e por sua “tendência” de diminuição ou crescimento.
7. Além da interação através de conexões excitatórias e inibitórias, existe uma interação indireta entre neurônios, baseada no fato de que a saúde de alguns neurônios influencia algumas

⁵O termo em inglês, mais adequado, é *self-feeling*

características de outros neurônios.

Podemos observar na Figura 3.2 a dependência do limiar de excitabilidade Π_0 e do consumo de energia $g_2(\Theta)$ ao grau de degeneração Θ do neurônio. Note que a partir de um ponto crítico Θ_c , o consumo aumenta, exaurindo rapidamente as reservas de energia, e o limiar diminui, criando condições para a geração espontânea de impulsos. Uma descrição detalhada do funcionamento do neurônio será apresentada na Seção 4.2.

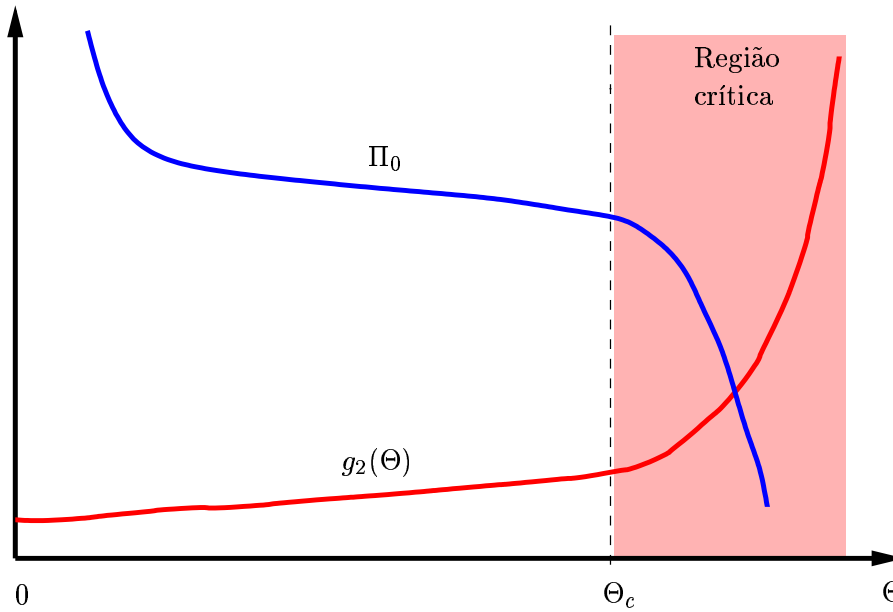


Figura 3.2: Dependência do consumo de energia ($g_2(\Theta)$) e do limiar de excitabilidade (Π_0) ao grau de degeneração do neurônio.

Os neurônios do agente neuroenergético não são todos iguais. Os dois tipos mais importantes são os neurônios da massa neural (detalhados no Capítulo 4) e os neurônios do centro emocional (especificados no Capítulo 5). Os neurônios da massa neural estão todos em uma mesma camada física, e a princípio, podem conectar-se com quaisquer outros neurônios (a princípio, porque na construção do agente faz-se necessária a divisão da massa neural em zonas, conforme veremos no Capítulo 5). Já os neurônios do centro emocional não se conectam a outros neurônios (e por isso não podem formar GAMs), apenas possuem conexões provenientes dos neurônios da massa neural, e sua saída (v), serve apenas para retroalimentar o neurônio. Desta forma o neurônio do centro emocional precisa de excitação da memória apenas para gerar o primeiro impulso, a partir do qual ele consegue se auto-excitar até sua completa regeneração. A Figura 3.3 na página oposta procura

ilustrar estes conceitos.

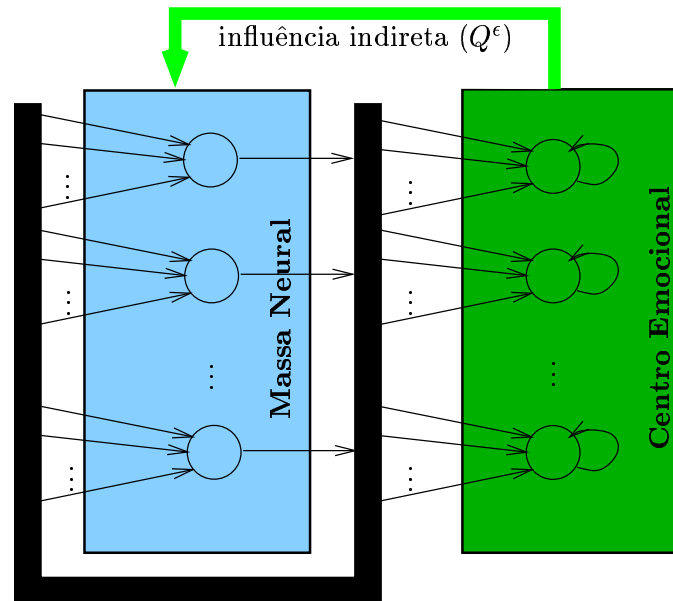


Figura 3.3: Organização física dos neurônios da massa neural e do centro emocional. Os neurônios da massa neural estão todos em uma mesma camada e podem interconectar-se com qualquer outro neurônio, enquanto que os neurônios do centro emocional possuem uma retro-alimentação e apenas recebem conexões dos neurônios da massa neural.

3.4 A Rede Neuroenergética

Chamamos de rede neuroenergética um conjunto de neurônios interconectados através de conexões excitatórias e inibitórias. No estado inicial, a rede é desorganizada, e os neurônios geram impulsos independentemente uns dos outros, uma vez que ainda não há conexões entre eles. Sob estas condições, o grau de degeneração dos neurônios é muito alto, o que implica num consumo alto de energia. As propriedades dos neurônios garantem a formação de conexões interneuronais que transformam a estrutura inicialmente desorganizada em uma rede interligada. Sobre esta rede, que chamaremos de *estrutura base*, organiza-se o processo de interação estável entre conjuntos neuronais, resultando em profunda renovação funcional, ou seja, regeneração de todos os neurônios.

Desta forma, o problema da sobrevivência dos neurônios não é resolvido devido à morte de alguns neurônios ou ao aumento da oferta de energia, mas devido à organização das relações

internas (entre os neurônios), e externas (com o ambiente), de forma a minimizar o consumo. As propriedades gerais do agente, inclusive as “inteligentes”, surgem como consequência da organização de várias formas e condições de funcionamento interno, energeticamente vantajosas. O sistema busca formas e condições de funcionamento vantajosas baseado unicamente na avaliação de seu estado interno, de acordo com mudanças na sua saúde.

3.4.1 Regimes de Sono e Vigília

Após a formação da estrutura base, iniciam-se na rede neuroenergética os ciclos diários, que consistem na alternância entre dois regimes: *sono* e *vigília*. O sono é um regime auto-organizado de funcionamento em que grupos de auxílio mútuo (GAM) formam uma fila circular para regeneração. GAMs são subconjuntos da rede neuroenergética sem conexões inibitórias e com conexões excitatórias entre seus neurônios. Uma vez formado, o regime de sono é muito estável, mas sua formação é difícil pois os neurônios necessitam de uma grande reserva de energia para fazer frente ao alto consumo no início deste regime.

Durante o sono os neurônios passam por uma profunda regeneração. Ela ocorre devido à geração de impulsos em alta frequência pelos neurônios dos GAMs, possível graças às conexões excitatórias entre eles. Fortes conexões inibitórias entre diferentes GAMs fazem com que um GAM em atividade impeça que outros iniciem a atividade, até que este tenha cessado sua geração em alta frequência. Desta forma, forma-se uma fila circular em que os GAMs se alternam na geração em alta frequência. Repetidas voltas na fila reduzem o grau de degeneração de todos neurônios até o ponto em que eles não conseguem mais gerar impulsos (devido ao aumento do limiar). Então a fila é destruída e a rede “acorda”, ou seja, entra no regime de vigília, que se caracteriza pelo aumento no grau de degeneração dos neurônios.

O consumo de energia varia muito durante o ciclo diário, sendo pequeno no início do regime de vigília e tendo seu pico no início do regime de sono. Como o fornecimento de energia é relativamente constante, é necessário que os neurônios acumulem reservas, que podem ser usadas nos períodos em que o consumo é maior do que o fornecimento. Para acumular reservas, tendo em vista que não podem aumentar a quantidade de energia que lhes é fornecida, os neurônios procuram prolongar as fases de pouco consumo, diminuindo a velocidade de degeneração nestas fases. Desta forma, o problema de existência da rede transforma-se no problema de acúmulo de reservas para a organização do próximo regime de sono.

A degeneração depende apenas do tempo e não pode ser diretamente influenciada pelo

neurônio. O que este pode fazer é estimular regenerações parciais através de estímulos, ou ações excitatórias, que gerem potencial excitatório suficiente para a geração de impulsos. Para que tais ações ocorram, são necessárias *excitações externas*⁶, provenientes de receptores. Existe um certo valor ótimo de excitação externa que permite uma redução significativa do consumo de energia, chamado de *fluxo ótimo de excitação*. O regime de vigília, do ponto de vista energético, consiste na desaceleração da degeneração do neurônio com o auxílio da excitação externa.

“O conceito neuroenergético de inteligência é a representação de propriedades intelectuais e emocionais do agente como “efeito colateral”, isto é, como consequência da resolução do problema de busca por excitação externa. (Emelyanov-Yaroslavsky, 1992)”

3.5 Memória e Centro Emocional

Como vimos, o agente neuroenergético tem dois componentes básicos: a unidade de armazenamento, ou memória, e o grupo de neurônios chamado de *centro emocional*. Os neurônios da memória podem criar conexões entre si, formando os grupos de auxílio mútuo, o que lhes possibilita trabalhar de maneira energeticamente eficiente. Já os neurônios do centro emocional não são capazes de criar conexões entre si, o que os impede de resolver o problema de minimização de consumo por conta própria. Em compensação, quando seu grau de degeneração está elevado, eles podem influenciar a memória, de forma que esta forneça a excitação necessária para sua regeneração e consequente redução na necessidade de energia.

O centro emocional é o componente crítico e unificador do agente. A saúde do agente é determinada pela saúde média dos neurônios do centro emocional. **Todo trabalho do agente, no regime de vigília, consiste em otimizar a saúde do centro emocional.**

Para que possam se regenerar, os neurônios da memória e do centro emocional necessitam de excitação externa. Para garantir um fluxo constante de excitações, o agente deve operar em ambientes conhecidos e trabalhar predominantemente no modo de confirmação de expectativas.

As propriedades dos neurônios são tais que levam à formação de elementos de memória. Como a capacidade de memória do agente é limitada, se o ambiente for muito diversificado, ele não pode ser simplesmente memorizado. Para seu bom funcionamento, é necessário que o agente compreenda e memorize as leis de funcionamento do ambiente, o que implica no surgimento de

⁶Emelyanov-Yaroslavsky chama as excitações externas de *noisy excitation*

funções de mais alto nível, que poderíamos chamar de “inteligentes”, como por exemplo, capacidade de generalização. Tanto a necessidade da existência de funções inteligentes quanto as maneiras pelas quais elas são obtidas, são consequência da tarefa de minimização de consumo. **A tarefa global do agente é a minimização do consumo de energia.**

3.5.1 Formação da Memória

As excitações externas adentram a rede neuroenergética através de seus receptores durante a fase de vigília (na fase de sono os receptores são bloqueados devido às conexões inibitórias com os GAMs). À medida em que as excitações externas que chegam a um grupo de neurônios (ligados a um mesmo receptor) se repetem, as conexões excitatórias entre estes neurônios se fortalecem (regra de treinamento⁷) e eles formam um *grupo neural*, isolando-se do restante da rede através da criação de conexões inibitórias.

Os grupos neurais são *grupos de auxílio mútuo* similares aos formados no regime de sono. A principal diferença reside na força das conexões entre seus neurônios, e na quantidade de neurônios num mesmo grupo. Nos grupos neurais, as conexões são mais fortes, auxiliando os neurônios na tarefa de renovação funcional. Além disso, o grupo neural é composto por um número relativamente pequeno de neurônios, e forma a representação interna (ou memória) do objeto/situação no ambiente externo que serviu de excitação inicial para a criação do grupo.

A excitação gerada internamente no grupo neural não é suficiente para que ele entre no estado ativo, de geração em alta frequência. Para que isto ocorra, o grupo neural precisa receber excitações externas, provenientes de receptores ou de outros grupos neurais. Ou seja, é necessário que se desenvolva um relacionamento entre grupos neurais, que, em última análise, leva ao surgimento das funções mais complexas do agente.

Grupos neurais podem formar-se em diferentes níveis. Seu nível é determinado pela origem da excitação que os formou. Grupos do primeiro nível são chamados de *grupos primários*⁸, e recebem excitação diretamente dos receptores da rede, formando o vocabulário básico da memória, para o qual as excitações externas são traduzidas (lembrando os repertórios primários sugeridos por Edelman (1987)). Os grupos primários, quando no estado ativo, geram excitação para outros neurônios, originando grupos em níveis superiores. Desta forma, a rede cria um modelo hierárquico

⁷ver Seção 4.2.5 na página 73.

⁸No original, *phoneme ensemble*, em referência aos fonemas das palavras. Os grupos de segundo nível são chamados de *word ensemble*.

do ambiente externo. Quando determinado grupo está no estado ativo, isto significa que a rede está “lembrando” do objeto que deu origem àquele grupo.

Do ponto de vista energético, a memória e os receptores surgem apenas como fonte de excitação externa. Ou seja, os grupos neurais tem como função principal a de formar grupos de auxílio mútuo, a fim de reduzir a necessidade de energia da massa neural durante o regime de vigília. O fato de eles modelarem, ou serem uma memória do ambiente é consequência; é secundário.

3.5.2 Funcionamento da Memória

A maior parte da memória do agente consiste de grupos neurais secundários, que estão relacionados a objetos e situações no ambiente externo. Da mesma forma que os neurônios, os grupos neurais têm dois estados ativos. O primeiro (*semi-ativo*, **S**) é o estado de geração de impulsos em baixa frequência. Este estado é facilmente atingido, estável, mas muito prejudicial: as reservas H dos neurônios são rapidamente consumidas. Chamamos os grupos neurais no estado **S** de *focos de excitação*.

O segundo estado (*ativo*, **A**) é o estado de geração de impulsos em alta frequência. Este estado é transitório: devido ao crescimento acentuado do limiar de excitabilidade, o grupo neural rapidamente passa ao estado de *descanso* **R** ($\mathbf{A} \Rightarrow \mathbf{R}$). O estado **A** é energeticamente lucrativo devido ao rápido decréscimo de Θ . Quando o i -ésimo grupo neural $\mathbf{N}_i$ está no estado **A** (denotemos isto por $\mathbf{N}_i^{\mathbf{A}}$), ele gera excitação para outros grupos neurais, criando um bom fluxo de excitação, e na memória a “imagem” do i -ésimo objeto está sendo ativada.

A atividade da memória é necessária à própria memória: ao resolver o problema de diminuir Θ para os grupos neurais, resolve-se o problema de formação do fluxo ótimo de excitação, e o comportamento autônomo do agente surge como a necessidade de construir ou encontrar uma situação externa, que forneça a excitação necessária para formar o potencial resultante U_i capaz de extinguir os focos de excitação $\mathbf{N}_i^{\mathbf{S}}$:

$$\mathbf{N}_i^{\mathbf{S}} + U_i \Rightarrow \mathbf{N}_i^{\mathbf{A}} \Rightarrow \mathbf{N}_i^{\mathbf{R}}.$$

Desta forma, o problema interno do agente de minimizar o consumo de energia transforma-se no problema de extinguir os focos de excitação.

O conjunto de focos de excitação na memória ($\{\mathbf{N}_i^{\mathbf{S}}\}$) representa o “desejo” do agente, e o compele a encontrar ou criar uma situação externa correspondente à interna, que vá fornecer a

excitação necessária para a extinção do foco de excitação. O processo de formação dos focos de excitação é um evento probabilístico de transição de $\mathbf{N}_i^{\mathbf{R}} \Rightarrow \mathbf{N}_i^{\mathbf{S}}$ que depende, entre outras coisas, da excitabilidade do grupo neural i , ou seja, da condutividade das conexões entre seus neurônios. A excitabilidade dos grupos neurais pode ser aumentada através do aumento na condutividade das conexões internas de seus neurônios. Este é o principal mecanismo de auto-controle do agente, no sentido de decidir por uma ou outra alternativa de solução.

Chamamos os grupos neurais com alta condutividade interna (comparados com certo padrão) de *dominantes*. Os dominantes tem maior probabilidade de transformar-se em focos de excitação, formando o núcleo de “desejos internos” do agente. Quando ocorre a passagem de estado $\mathbf{N}_i^{\mathbf{S}} \Rightarrow \mathbf{N}_i^{\mathbf{A}}$, a condutividade das conexões internas diminui, e $\mathbf{N}_i$ deixa de ser dominante. O dominante pode se formar a partir de qualquer grupo que permaneça por muito tempo no estado $\mathbf{S}$, o que corresponde ao fato de que o objeto ou situação i não está sendo “visto” ou “percebido”.

“O comportamento do agente no ambiente externo é um reflexo de sua atividade interna na tentativa de eliminar os dominantes na memória. (Emelyanov-Yaroslavsky, 1992)”

3.5.3 Controle do Agente — Centro Emocional

Conforme vimos na Seção 3.3, a saúde do neurônio — determinada a partir das reservas de energia e de sua tendência de queda ou aumento — é uma medida do “bem-estar” (*self-feeling*) do neurônio. Para caracterizar o “bem-estar” do agente neuroenergético como um todo, utilizamos um parâmetro chamado de *saúde do agente*. O funcionamento do agente no regime de vigília é organizado de forma a maximizar sua saúde. Isto ocorrendo, automaticamente são resolvidos os problemas de fluxo ótimo de excitação e extinção dos focos de excitação.

A saúde do agente não é determinada pela saúde média de todos seus neurônios, mas sim pela saúde de um pequeno subconjunto de neurônios especiais, que compõem o *centro emocional*. Ou seja, a saúde do agente é dada pela saúde do centro emocional, identificada pela variável Q^e . É a saúde do centro emocional que vai determinar o comportamento da memória, e, conseqüentemente, dos mecanismos de ação do agente (haja vista que estes são acionados pela memória). Desta forma, o centro emocional não tem apenas o papel de “sentir” por todo o agente, mas também é o responsável por dirigir sua atividade.

Haja vista que os neurônios do centro emocional não podem formar conexões com outros neurônios, o que os impede de formar GAMs, eles necessitam de excitações regulares da memória

para reduzir o valor de Θ . As excitações são fornecidas por grupos primários no estado ativo, e a atividade contínua de grupos primários pertencentes a um mesmo grupo secundário, forma um *signal* para o centro emocional. Este sinal leva uma parte dos neurônios do centro emocional, com alta excitabilidade ($\Theta > \Theta_c$), a entrar em atividade, “lançando-os” à região de baixos valores de Θ , onde formam um *lote neural*⁹. O estado do centro emocional é definido pelo formato da distribuição de Θ dos seus neurônios (n^θ), conforme mostra a Figura 3.4. Assim sendo, a atividade da memória não é necessária somente à memória, mas também ao centro emocional.

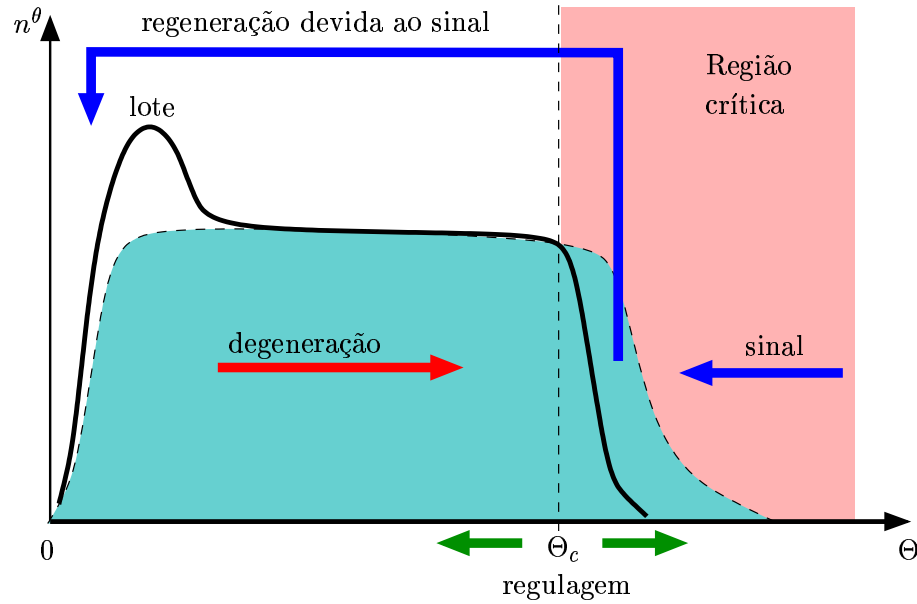


Figura 3.4: Distribuição dos neurônios do centro emocional em função de Θ na ausência de sinais (linha pontilhada) e após um sinal da memória (linha cheia). n^θ – número de neurônios do centro emocional com este valor de Θ .

O número de neurônios na região crítica e sua posição dentro dela determinam a demanda de energia do centro emocional, isto é, o *déficit de energia*, causado pela diminuição nas reservas e afetando diretamente sua saúde. O déficit de energia modula os principais processos no agente: atividade da memória, atividade de busca dos sistemas receptores e a magnitude da ação tomada pelos sistemas motores. Para executar uma ação, o agente precisa efetuar uma mobilização emocional, isto é, criar um grande lote de neurônios na região crítica. A sensação “ruim”, “desagradável”, no agente, é definida pelo valor e velocidade de crescimento do déficit de energia do centro emocional. De modo semelhante, a sensação “bom”, “agradável” é definida pelo valor de

⁹No original, *neural batch*.

decréscimo do déficit. O único objetivo do agente, do ponto de vista das sensações, é otimizar sua saúde: maximizar o “bom” e minimizar o “ruim”. Uma vez que o estado do agente é determinado pela variação do déficit de energia, os estados “bom” e “ruim” não são estáveis, e o agente precisa estar em constante atividade para maximizar sua saúde.

Os sinais gerados pela memória formam grupos compactos de neurônios (lotes neurais) na distribuição de Θ do centro emocional (Figura 3.4 na página precedente). O tamanho e a posição destes lotes depende basicamente da magnitude dos sinais, e do intervalo entre eles. Devido ao processo de degeneração dos neurônios, os lotes movem-se para a região crítica e, ao adentrá-la, criam os estados de elevado *tônus emocional* no agente. Um lote neural na região crítica, cria um tônus negativo, e requer da memória e dos receptores externos o envio de um sinal, que o leve de volta à região de baixos valores de Θ . Ou seja, em certos momentos, lotes criam requisições, pedindo sinais de determinada magnitude. Nenhuma sequência de sinais pode satisfazer completamente o centro emocional, devido a algumas limitações resultantes de propriedades dos neurônios. As situações externas que geram sinais são classificadas em “boas” ou “ruins”, de acordo com sua capacidade de melhorar o estado do centro emocional. Situações “boas” são aquelas que rapidamente criam um sinal capaz de levar o lote à região de baixos valores de Θ , criando assim um tônus positivo, enquanto que situações “ruins” funcionam no sentido contrário.

O centro emocional controla a memória basicamente através da influência de Q^e na conectividade dos grupos neurais. Esta é a única maneira que o centro emocional têm de influenciar os neurônios da massa neural, pois não há conexões dos neurônios do centro emocional para os neurônios da massa neural. O estado “bom” no centro emocional aumenta a excitabilidade dos grupos neurais, facilitando sua passagem do estado de descanso para o estado de foco de excitação ($\mathbf{R} \Rightarrow \mathbf{S}$), e o estado “ruim” facilita a passagem dos grupos no estado de foco de excitação para o estado ativo ($\mathbf{S} \Rightarrow \mathbf{A} \Rightarrow \mathbf{R}$), isto é, facilita a extinção dos focos de excitação.

Para ajustar os desejos internos às excitações externas, o centro emocional utiliza uma propriedade de seus neurônios: eles podem variar fortemente o valor de Θ_c . A variação de Θ_c tem a função de evitar que estados “muito bons” ou “muito ruins” ocorram. Quando muitos neurônios estão na região crítica, e o estado do centro emocional está ruim o suficiente, Θ_c move-se para a direita, simulando a esperança de chegada de um sinal para o lote. Quando o número de neurônios na região crítica está abaixo de um valor normal, Θ_c move-se para a esquerda. Pode também ocorrer que Θ_c não varie, de forma a produzir um tônus emocional muito forte com a presença de um lote na região crítica. Como mencionamos anteriormente, para acionar os sistemas motores, faz-se necessário um forte tônus emocional, que é formado por grandes lotes penetrando profundamente

na região crítica, enquanto Θ_c não é alterado.

Outra peculiaridade dos neurônios do centro emocional é sua acelerada taxa de degeneração, e pequena capacidade de armazenar energia. Isto os torna muito vulneráveis e dependentes do estado da memória. Esta dependência é tal que, quanto maior o número de focos de excitação na memória, mais crítica a situação do centro emocional, de forma que o centro emocional pode ser visto como um “amplificador de problemas” da memória.

3.6 Regime de Subconsciência

A memória do agente é formada pelo conjunto dos vários grupos neurais (cada um correspondendo a certo conhecimento) que compõem o seu *vocabulário*. Enquanto um grupo neural está inativo, suas conexões interneuronais decrescem gradualmente, podendo desaparecer após algum tempo, o que significa a perda de algum conhecimento. Por isso, a memória precisa resolver o problema de regeneração do *vocabulário passivo*, formado por grupos que não conseguem entrar em atividade no regime de vigília. As condições para a regeneração do vocabulário passivo surgem durante o regime de *subconsciência*.

Chamamos de subconsciência o estado da massa neural quando uma parte está no regime de sono e outra parte no regime de vigília, simultaneamente. A subconsciência é possível graças à divisão da massa neural em zonas fracamente interconectadas (por exemplo, dois hemisférios), de forma que o regime de sono em uma das zonas bloqueia a atividade dos receptores e do centro emocional, deixando a zona que está no regime de vigília sem o auxílio de excitação externa. Os grupos do vocabulário passivo na zona que está em vigília conseguem se regenerar espontaneamente, graças à sua alta excitabilidade (os detalhes desse processo serão discutidos no Capítulo 5). A duração do regime de subconsciência é pequena, e assim há um limite no número de grupos que podem ser renovados antes que suas conexões desapareçam. Este é o principal fator que determina a capacidade máxima de memória do agente, muito mais do que a quantidade de neurônios.

No regime de subconsciência, além da renovação das conexões, ocorre também a formação de novos grupos neurais. É importante ressaltar que estes novos grupos não surgem como resultado direto da percepção, mas como resultado da atividade simultânea de diversos grupos neurais, não necessariamente correlacionados pela percepção no regime de vigília. Os novos grupos que se mostrarem melhores do que os grupos que os formaram (mais simples ou mais gerais), tendem a substituí-los após algum tempo, devido à característica da memória de que os melhores grupos têm

mais chances de se regenerar, impedindo a regeneração dos concorrentes que representam o mesmo conhecimento. Esta capacidade de generalização e união de conceitos, associada à substituição de grupos neurais, faz com que a renovação da memória a leve a uma organização mais racional. Assim sendo, a memória não se altera somente devido à alterações no ambiente, mas também devido ao processo de racionalização.

3.7 Sistema de Auto-excitação

Vimos que o fluxo de excitação necessário para otimizar o consumo de energia do agente é proveniente dos receptores e dos grupos neurais da memória. Mais precisamente, a quantidade necessária de excitação é criada quando a memória trabalha na condição de confirmação de expectativas, isto é, quando os grupos secundários conseguem “prever” a próxima entrada dos receptores e ativar os grupos primários correspondentes antes que a excitação chegue ao receptor. Mas, durante o período de inatividade de um grupo neural, o ambiente externo pode ter-se alterado, e o objeto/situação que deu origem a ele pode ter sido removido do ambiente. Neste caso, torna-se impossível receber do ambiente a excitação necessária para levar o grupo ao estado ativo, não sendo possível gerar o fluxo ótimo de excitação.

Para reduzir a dependência do agente em relação ao ambiente, introduzimos a capacidade de auto-excitação. A partir do momento em que o agente possui uma quantidade relativamente grande de grupos neurais, têm início a formação de um *vocabulário de nomes*, formado por grupos neurais associados a objetos/situações no ambiente. Através do mecanismo de auto-excitação, o agente consegue “pronunciar” estes nomes, ativando os receptores, que por sua vez geram excitação para os grupos neurais correspondentes. Assim, forma-se o fluxo de excitação necessário para a desativação dos focos de excitação, sem necessitar da influência do ambiente.

3.8 Resumo

Neste capítulo apresentamos, de forma resumida, as principais propriedades do neurônio neuroenergético, e as características da rede neural decorrente da interconexão dos neurônios. Também introduzimos os principais componentes do agente neuroenergético, e de como o funcionamento destes componentes dá origem a funções de alto nível, passíveis de serem chamadas de “inteligentes”. Vamos então a um resumo sequencial dos principais aspectos do agente proposto por Emelyanov-

Yaroslavsky:

1. A propriedade de degeneração do neurônio e a limitação na quantidade disponível de energia criam a demanda por atividade, ou seja, criam o problema a ser resolvido do ponto de vista energético.
2. A capacidade de regeneração através da geração de impulsos e as propriedades das conexões interneuronais possibilitam a auto-organização dos neurônios em uma rede neuroenergética, na qual eles estimulam-se mutuamente, reduzindo assim sua necessidade de energia.
3. O acúmulo de reservas próprias de energia, a grande variação nas necessidades de energia durante um ciclo diário, com uma fase de excesso de oferta de energia, e a dependência desta fase do fluxo de excitação, criam a tarefa de criação do fluxo ótimo de excitação.
4. As propriedades dos neurônios e das conexões, com o auxílio de excitações provenientes do ambiente externo, possibilitam a formação de grupos neurais, capazes de atuar no papel de geradores de excitação.
5. Para que os grupos neurais possam gerar um fluxo constante de excitação, é necessário que haja um sistema de controle. Este sistema é composto pela totalidade dos grupos neurais e por sua correlação com objetos e situações do ambiente externo, e se auto-organiza graças à influência do ambiente. Desta forma, os geradores de excitação acabam por formar uma memória do ambiente externo.
6. Os grupos neurais podem encontrar-se em dois modos ativos: geração de impulsos em alta frequência, que é energeticamente vantajoso; e geração em baixa frequência, que é prejudicial energeticamente, mas estável, chamado de foco de excitação. Desta forma surge no agente a tarefa de extinguir os focos de excitação. Para tanto, é necessário encontrar ou criar uma situação no ambiente, que leve o foco de excitação a entrar em atividade. Assim, surge a necessidade de ação no agente.
7. O fluxo de excitação é formado com a extinção dos focos de excitação, e deve ser constante. Isto significa que deve haver condições para que sempre de novo surjam focos de excitação, o que se torna possível graças à introdução no agente de um modulador da excitabilidade dos grupos neurais, composto por neurônios especiais, chamado de centro emocional.
8. A separação da massa neural em hemisférios fracamente interligados e as relações entre o centro emocional, a memória e os receptores, dão origem a situações em que é difícil a extinção dos focos de excitação. É aí que surge o regime de subconsciência, no qual o problema

de sobrevivência dos neurônios é resolvido quando os grupos neurais entram em atividade devido ao elevado grau de degeneração, dando origem a grupos neurais novos, energeticamente mais vantajosos. Esta otimização do consumo de energia leva à universalização do modelo do ambiente externo, ou seja, à construção de generalizações.

9. Os valores da condutividade das conexões nos grupos neurais variam entre limites bastante grandes, e são determinados pela história de atividade do grupo. Grupos com grande condutividade têm grande excitabilidade e tornam-se dominantes. A composição de dominantes determina o comportamento do agente, os seus “desejos”. O trabalho do agente é determinado pela tarefa de liquidar os dominantes.
10. No regime de vigília deve-se garantir ao agente condições de permanecer em atividade suficientemente intensa, ao que contribuem as excitações provenientes do ambiente. Mas se o ambiente acessível ao agente, por algum motivo, deixar de fornecer a excitação necessária, não haverá condições para a atividade da memória. Este é o pré-requisito para o desenvolvimento do sistema de auto-excitação, cujo propósito é usar “nomes” de objetos e situações, para contribuir com o processo de atividade intensa da memória sem auxílio externo.

Capítulo 4

Rede Neuroenergética

*Do not worry about your difficulties in mathematics;
I can assure you that mine are greater.*

(Albert Einstein)

4.1 Introdução

A construção do agente neuroenergético depende, em primeiro lugar, do funcionamento de seu elemento básico: o neurônio. Neste capítulo descrevemos em detalhes os diversos parâmetros e restrições do neurônio, e verificamos a capacidade de auto-organização da rede neuroenergética. No momento, não há a preocupação com a construção do agente como um todo ou com o surgimento de funções inteligentes no sistema. O objetivo é comprovar a viabilidade energética da rede, ou seja, comprovar que os neurônios conseguem reduzir o consumo de energia quando se organizam através da formação de conexões interneuronais, além de verificar a existência de condições para o posterior desenvolvimento dos componentes do agente.

Uma grande dificuldade encontrada nesta fase do trabalho foi a de definir as equações que regem o comportamento do neurônio, a partir de sua descrição encontrada na bibliografia. Apesar de algumas equações terem sido utilizadas da maneira proposta por Emelyanov-Yaroslavsky, outras tiveram de ser modificadas significativamente, pois eram muito genéricas ou não apresentavam o comportamento desejado, descrito no texto. Isto se deve em parte a possíveis erros nas equações disponíveis na internet e à grande quantidade de termos indefinidos. As equações possuem complexas relações de interdependência, e uma série de restrições impostas ao funcionamento da

rede devem ser satisfeitas, de forma que a definição dos valores das constantes também se mostrou bastante laboriosa. Mas as principais constantes tinham valores especificados nas referências, facilitando o início do trabalho e permitindo a construção de uma rede que apresentasse resultados semelhantes aos obtidos por Emelyanov-Yaroslavsky.

4.1.1 Organização do Capítulo

A Seção 4.2 apresenta uma especificação detalhada das equações e restrições que regem o comportamento do neurônio. A Seção 4.3 analisa os aspectos energéticos resultantes do trabalho conjunto dos neurônios na rede neuroenergética, e a Seção 4.4 apresenta os resultados obtidos com a implementação computacional da rede. Finalmente, a Seção 4.5 faz um breve resumo do capítulo.

4.2 Neurônio

Antes de apresentar as equações que regem o comportamento do neurônio, é necessário chamar a atenção à grande interdependência entre elas, de forma que não se pode definir todos os termos das equações no momento em que elas são descritas. O neurônio também possui diversas variáveis que definem seu estado, e estas são recalculadas aplicando-se as equações a cada intervalo de tempo. Uma das variáveis mais utilizadas é a frequência de geração de impulsos. O neurônio utiliza sua própria frequência (representada por v) para calcular o valor de diversas variáveis, e também a frequência de outros neurônios (representada por v_j) no cálculo do potencial resultante. Por fim, é importante frisar que os impulsos gerados pelo neurônio são sempre iguais (em amplitude, intensidade, etc.), e por isso não são utilizados diretamente. O que é utilizado é a quantidade de impulsos gerados em determinado intervalo de tempo, sua frequência.

4.2.1 Degeneração e Regeneração

Na natureza, sistemas simples conseguem manter sua integridade graças à forte ligação de suas estruturas. Já em sistemas complexos, compostos por várias partes, a integridade pode ser mantida somente se houver uma maneira de recuperar áreas destruídas ou danificadas. Sistemas vivos conseguem manter-se em funcionamento, apesar de terem estruturas complexas, porque têm a habilidade de permanentemente, e de forma independente, recuperar partes danificadas. O neurônio neuroenergético assemelha-se em muitos aspectos a um neurônio biológico e, desta forma, está

também sujeito a agressões e danos que, se não revertidos, podem destruí-lo. Estas agressões e danos são simulados através do grau de degeneração Θ do neurônio, que é uma de suas principais características e depende apenas do tempo, não podendo ser influenciado diretamente pelo neurônio. Quanto maior o valor de Θ , maior o consumo de energia do neurônio, dificultando sua sobrevivência num ambiente em que a quantidade de energia é limitada.

Mas o neurônio é capaz de regenerar-se através da geração de impulsos. O grau de degeneração é reduzido a cada impulso, e a dimensão desta redução depende da frequência de geração v e do valor de Θ (a redução é maior para valores maiores de Θ e v). Além disso, a redução devida ao último impulso de uma série é significativamente maior do que a redução devida aos impulsos gerados no interior da série. Isto pode ser entendido do ponto de vista físico da seguinte maneira: a regeneração devida a um impulso não termina imediatamente após o disparo do impulso, mas continua por algum tempo, desde que não seja interrompida pela geração de um novo impulso. Como o último impulso não é interrompido, ele tem um efeito regenerativo maior. É importante observar que a geração de um impulso isolado, não precedido nem seguido de outros impulsos, equivale ao último impulso de uma série, e não ao primeiro, tendo o mesmo poder regenerativo daquele.

Desta forma, antes de ser um mecanismo de comunicação, a geração de impulsos por parte do neurônio é um estado de intensa atividade de regeneração de estruturas danificadas. Ao atingir um limite mínimo no grau de degeneração, o neurônio fica impedido de gerar novos impulsos e entra no estado de inatividade. A principal consequência da redução de Θ é a diminuição do consumo de energia por parte do neurônio. A variação do grau de degeneração do neurônio ao longo do tempo é dada pela Equação 4.1:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \begin{cases} \Delta \Theta = \vartheta_d - \left(k_\theta + \frac{\Theta}{\Theta_c} \right) v, & \text{durante uma série de impulsos;} \\ \Delta \Theta + \vartheta_l, & \text{no último impulso da série;} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\vartheta_d, \vartheta_l, k_\theta = \text{const}, \quad \vartheta_d > 0, \quad \vartheta_l < 0, \quad k_\theta > 0.$$

onde t – tempo; ϑ_d – aumento de Θ a cada unidade de tempo; ϑ_l – decréscimo de Θ devido ao último impulso de uma série.

4.2.2 Geração de Impulsos

Como vimos anteriormente, a geração de impulsos nos neurônios neuroenergéticos tem como principal função efetuar sua regeneração, permitindo uma redução no consumo de energia. Nos neurônios

biológicos, cujo comportamento os neuroenergéticos procuram reproduzir, um impulso ocorre quando o potencial de ação ultrapassa o limiar dinâmico Π_d . O primeiro impulso após um período de inatividade, é até certo ponto probabilístico, enquanto os impulsos seguintes dependem quase que unicamente do potencial de ação e de Π_d . O limiar dinâmico sofre uma grande variação no curto intervalo de tempo entre dois impulsos, e o formato da dependência $\Pi_d(\tau)$, proveniente de estudos neurofisiológicos (Guyton, 1992, pág. 99), está ilustrado na Figura 4.1.

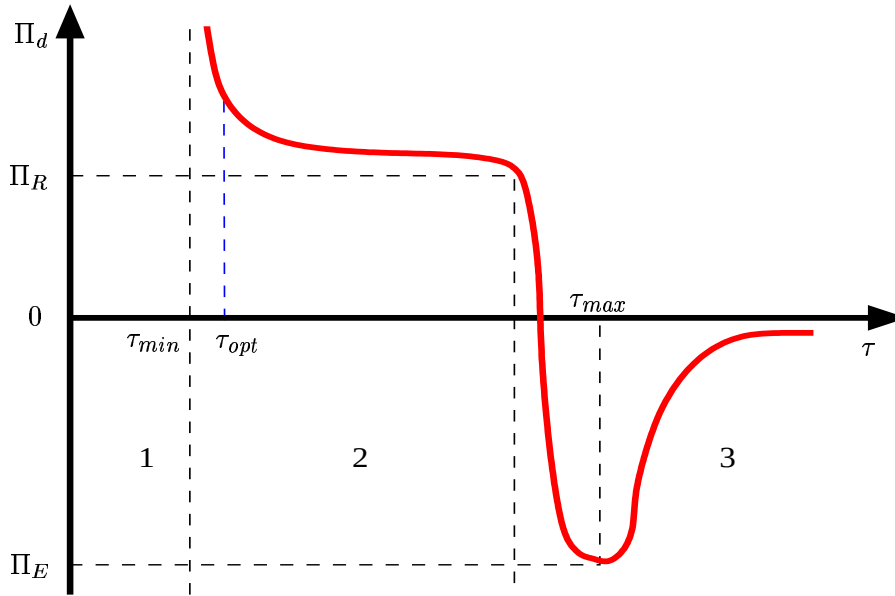


Figura 4.1: Dependência do limiar dinâmico Π_d ao tempo τ transcorrido desde o último impulso: 1 – região de refração absoluta; 2 – região de refração relativa; 3 – região de exaltação; Π_R – limiar de refração; Π_E – limiar de exaltação.

Podemos observar que nos primeiros instantes após um impulso, o neurônio biológico encontra-se na região de refração absoluta, e não consegue gerar novos impulsos. Esta é a limitação superior à sua frequência de geração de impulsos. Logo em seguida, ele entra na região de refração relativa, na qual consegue gerar um novo impulso se tiver um potencial alto (que só pode ser obtido com o auxílio de excitações provenientes de outros neurônios). Na região de exaltação, a geração de impulsos pode ser espontânea, sem auxílio externo, desde que outros fatores, como potencial inibitório ou fadiga sináptica, não a impeçam. Finalmente, se o neurônio não gerar um novo impulso até τ_{max} , ele entra no estado de descanso, ou inativo.

O neurônio neuroenergético, diferentemente do neurônio biológico, opera em intervalos de tempo discreto (t). Assim, ao invés de gerar um impulso toda vez que o potencial ultrapassa o

limiar, ele produz como saída a frequência de geração de impulsos v , indicando quantos impulsos ele gera a cada intervalo $t = \tau_{max}$. Levando em conta que $v = 1/\tau$, podemos construir a função $v_0(U)$ (Figura 4.2 na página seguinte) que determina a frequência de impulsos em função do potencial resultante U (definido na Seção 4.2.3). É importante ressaltar que esta função $v_0(U)$ difere de maneira significativa das funções sigmoidais comumente utilizadas em redes neurais artificiais, pois descreve o neurônio como um elemento com três estados estáveis: descanso; geração de impulsos em baixa frequência na região de exaltação; e geração de impulsos em alta frequência na região de refração relativa. Da mesma forma que ocorre nos neurônios biológicos, inicialmente a frequência de geração de impulsos aumenta rapidamente com o aumento do potencial, mas este aumento é cada vez menor à medida que se aproxima da frequência máxima v_{max} , simulando o processo de fadiga das sinapses (Guyton, 1992). Além disso, o caráter probabilístico do primeiro impulso do neurônio biológico, após um tempo de inatividade, é simulado através da função $\pi(U)$ (Equação (4.3)).

$$v = v_0(U)\pi(U) \quad (4.2)$$

$$\pi(U) = \begin{cases} 1, & U \geq 0; \\ 1, & U \geq \Pi_E, \quad v \neq 0; \\ \text{sign}(e^{\beta U} - \xi), & \text{cc.} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$v_0(U) = \begin{cases} 0, & U < \Pi_E; \\ v_{min}, & \Pi_E \leq U \leq \Pi_R; \\ v_{max} - (v_{max} - v_{min}) e^{(-\lambda(U - \Pi_R))}, & U > \Pi_R. \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\beta, \lambda = \text{const}, \quad \beta, \lambda > 0;$$

$$\text{sign}(x) = (x > 0) ? 1 : 0;$$

onde ξ – valor aleatório distribuído uniformemente no intervalo $[0:1]$; π – componente probabilística para o início da geração de impulsos após um período de inatividade; Π_E – limiar de exaltação, que é o limite para a entrada na região de exaltação; Π_R – limiar de refração, que limita a região de refração relativa, na qual ocorre a geração de impulsos em alta frequência; v_{min} – frequência mínima de geração de impulsos; v_{max} – frequência máxima de geração de impulsos.

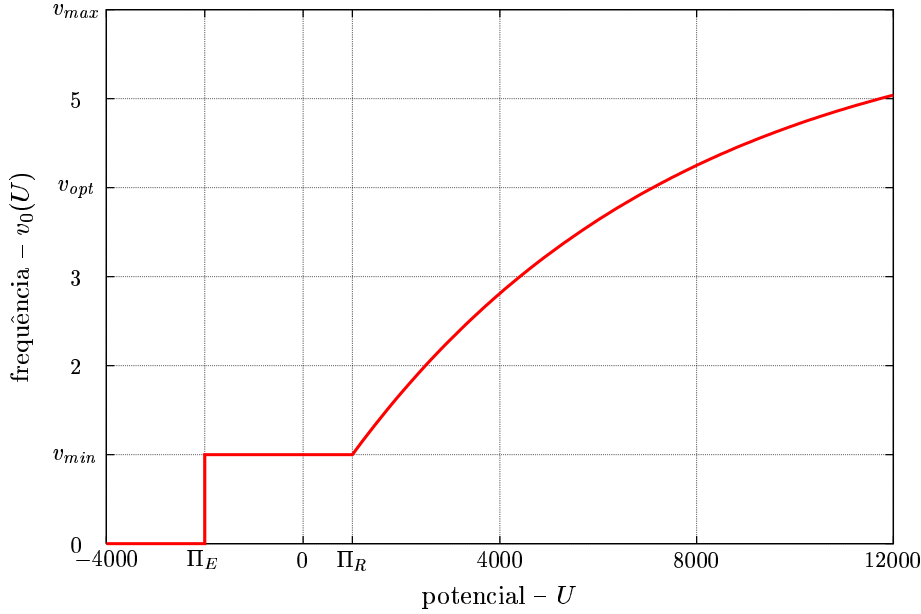


Figura 4.2: Dependência da frequência (v_0) ao potencial resultante (U)

As Equações mostram que o neurônio necessariamente gera impulsos quando $U \geq 0$. Quando $\Pi_E \leq U < 0$ o neurônio consegue gerar impulsos sem excitação externa e o início da geração é essencialmente probabilístico; e quando $U < \Pi_E$ ele não gera impulsos. O valor da constante β na Equação 4.3 deve ser ajustado de forma que a probabilidade ($\pi(U)$) de que um neurônio isolado inicie a geração de impulsos, aumente apenas quando o neurônio já estiver bastante degenerado, com o consumo maior do que a alimentação. Esta é uma das principais causas que leva à auto-organização dos neurônios da rede.

Outro fator determinante para a auto-organização da rede neuroenergética é a posição da frequência ótima de geração de impulsos v_{opt} . É fundamental que esta frequência esteja localizada na região de refração relativa, uma vez que ao gerar impulsos nesta frequência, o neurônio obtém a redução mais eficiente de Θ , com o menor consumo de energia. Como podemos observar na Figura 4.2, v_{opt} é um pouco menor do que a frequência máxima e bem maior do que a mínima, de forma que só pode ser atingida com o auxílio de potencial excitatório proveniente de outros neurônios. Além da frequência v_{opt} , existe um segundo modo de operação energeticamente vantajoso para o neurônio: a geração de impulsos isolados, únicos. Isto se deve ao fato de que a redução de Θ devida a um impulso isolado ou ao último impulso de uma série, é significativamente maior do que a redução devida a um impulso no interior de uma série (Equação 4.1). **A eficiência energética dos impulsos isolados é um dos principais fatores que leva ao surgimento de funções**

inteligentes no agente.

4.2.3 Potencial Resultante

O potencial resultante (U) do neurônio, é dado pelo somatório dos potenciais excitatórios e inibitórios, e do limiar de excitabilidade Π , segundo as seguintes equações:

$$U = k_U W - \Pi; \quad (4.5)$$

$$W = W^+ \{v, t\} + W^- \{v, t\}; \quad (4.6)$$

$$\Pi = \Pi_0(\Theta) + \Pi_S \{v, t\}; \quad (4.7)$$

onde W – potencial proveniente das conexões; k_U – constante calculada em função do número de conexões de cada neurônio, que tem por finalidade ajustar a proporção entre os valores de W e Π ; W^+ – potencial excitatório; W^- – potencial inibitório; Π_0 – limiar “puro”; Π_S – limiar estático; sendo que W e Π_S dependem da variação de v ao longo do tempo. É importante observar que a Equação 4.5 não contém referência explícita à excitação externa, porque os receptores são tratados como um tipo especial de neurônio que recebe o potencial excitatório diretamente do ambiente.

4.2.3.1 Limiar Estático

O limiar estático Π_S depende do tempo transcorrido desde o último impulso, ou seja, depende da frequência de geração de impulsos. Ele tem por finalidade reproduzir duas propriedades dos neurônios biológicos: impossibilidade de geração de impulsos em alta frequência durante muito tempo (fadiga de transmissão das sinapses), e aumentos sucessivos e temporários da excitabilidade do neurônio (facilitação pós-tetânica) (Guyton, 1992). Quando Π_S atinge um certo valor crítico Π_{S_c} , ele cresce rapidamente até o valor máximo $\Pi_{S_{max}}$, de forma que a geração de impulsos é interrompida, levando o neurônio ao estado de descanso. Sempre que o crescimento de Π_S for o responsável pela interrupção da atividade do neurônio, dizemos que o ele está no *estado latente*. Durante este estado, os valores de Π_S decrescem até tornarem-se negativos, facilitando o início de

uma nova fase de geração de impulsos, no estado de *facilitação pós-tetânica*:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi_S}{\partial t} = k_s (\Psi\{\Pi_S, v\} - \Pi_S), & \Pi_S < \Pi_{S_c}, \quad v \neq 0; \\ \Pi_S = \Pi_{S_{max}}, & \Pi_S \geq \Pi_{S_c}, \quad v \neq 0; \\ \frac{\partial \Pi_S}{\partial t} = -l_s R(\Pi_S) \Psi\{\Pi_S\}, & v = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

$$k_s, l_s = \text{const.}$$

onde Ψ – variável auxiliar cuja variação ao longo do tempo depende de Π_S e de v (Equação 4.9); Π_{S_c} – certo valor crítico de Π_S ; $\Pi_{S_{max}}$ – certo valor máximo de Π_S que indubitavelmente interrompe a geração de impulsos; $R(\Pi_S)$ – função que garante redução rápida de Π_S para baixos valores de Π_S e redução lenta para altos valores de Π_S :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = k_\psi v^2 - l_\psi \Pi_S, & \Pi_S < \Pi_{S_c}, \quad v \neq 0; \\ \Psi = \Pi_{S_{max}}, & \Pi_S \geq \Pi_{S_c}, \quad v \neq 0; \\ \frac{\partial \Psi}{\partial t} = m_\psi (\Pi_S - \Psi), & v = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$R(\Pi_S) = 0.02 + \left[\frac{1 - 0.02}{1 + \left(\frac{|\Pi_S|}{k_r} \right)^{l_r}} \right] \quad (4.10)$$

$$k_r, l_r, k_\psi, l_\psi, m_\psi = \text{const.}$$

Os valores das constantes devem ser escolhidos de tal maneira que Π_S atinja o valor crítico Π_{S_c} somente quando o neurônio estiver gerando impulsos em alta frequência. Ou seja, o limiar estático deve ser tal que a geração de impulsos na frequência mínima v_{min} possa prolongar-se indefinidamente, mas seja interrompida em pouco tempo quando $v = v_{opt}$. Assim, da mesma forma que a existência de conexões inibitórias, a Equação 4.8 serve como uma restrição para a eficácia energética do neurônio, impedindo-o de gerar impulsos na frequência ótima por muito tempo.

4.2.3.2 Limiar Puro

O limiar puro Π_0 deve refletir dois aspectos: a impossibilidade de neurônios com baixo grau de degeneração gerarem impulsos, e o aumento da excitabilidade de neurônios bastante degenerados. Ou seja, quando Θ atinge certo valor Θ_{min} , o limiar Π_0 cresce acentuadamente para evitar que

o neurônio possa gerar impulsos, ao passo que, quando Θ ultrapassa um valor crítico Θ_c o limiar aproximar-se rapidamente de zero, facilitando a regeneração do neurônio. A Equação 4.11 apresenta uma boa aproximação do comportamento desejado, conforme podemos observar na Figura 4.3:

$$\Pi_0 = \begin{cases} \Pi_{0_{max}}, & \Theta < \Theta_{min}; \\ k_\phi \Phi(l_\phi \Theta), & \Theta_{min} \leq \Theta < \Theta_{max}; \\ 0, & \Theta \geq \Theta_{max}; \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\Phi(x) = 1 + \frac{b_\phi}{x^{c_\phi}} - d_\phi \tanh(e_\phi(x - f_\phi)) + \frac{1}{x^2 - h_\phi} \quad (4.12)$$

$$k_\phi, l_\phi, b_\phi, c_\phi, d_\phi, e_\phi, f_\phi, h_\phi = \text{const},$$

onde $\Pi_{0_{max}}$ – valor alto que invariavelmente impede o neurônio de gerar novos impulsos; k_ϕ, l_ϕ – constantes para transformar a escala de Φ e Θ ; Θ_{max} – ponto a partir do qual $\Pi_0 = 0$; $\tanh$ – função tangente hiperbólica.

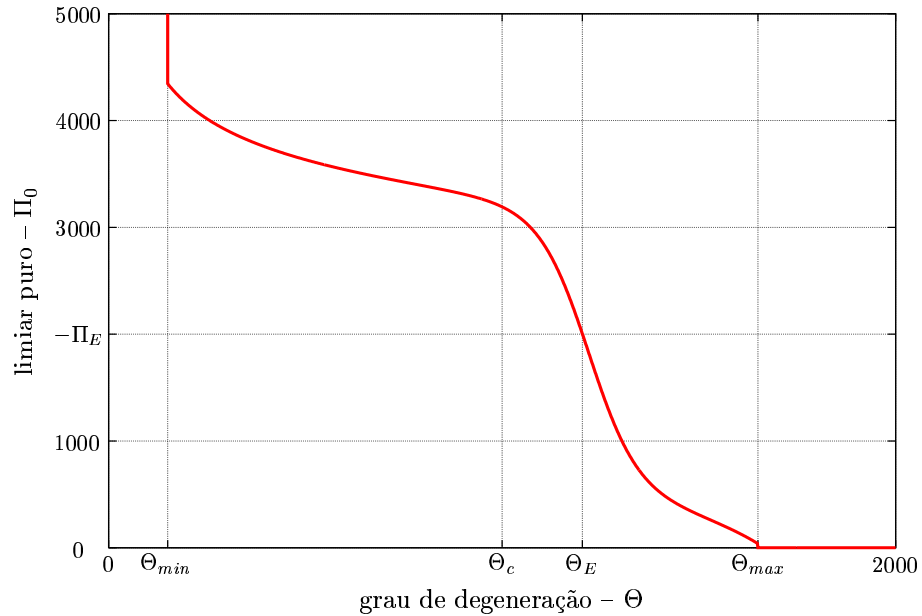


Figura 4.3: Dependência do limiar puro (Π_0) ao grau de degeneração (Θ)

A partir das Equações (??), (4.4) e (4.5), podemos reescrever a condição para a geração de impulsos da seguinte maneira:

$$W^+ + W^- \geq \Pi_0 + \Pi_S + \Pi_E, \quad (4.13)$$

que na ausência de conexões (e conseqüentemente de excitação externa) pode ser escrita como

$$0 \geq \Pi_0 + \Pi_S + \Pi_E. \quad (4.14)$$

Uma vez que inicialmente $\Pi_S = 0$ para todos os neurônios, e que sem excitação externa o neurônio não pode passar da região de exaltação para a região de refração relativa, o *estado inicial* da rede neuroenergética pode ser definido pela seguinte equação:

$$\Pi_0(\Theta_E) = -\Pi_E, \quad \Theta_E > \Theta_c; \quad (4.15)$$

onde Θ_E – grau de degeneração a partir do qual Π_0 é menor do que o limiar de exaltação, e o neurônio consegue gerar impulsos espontâneamente.

O formato da função $\Pi_0(\Theta)$ e a magnitude do limiar de exaltação Π_E devem ser escolhidos de tal maneira que o consumo no estado inicial $g(v, \Theta_E)$ (Equação 4.17) seja bem maior do que na região $[\Theta_{min}, \Theta_c]$. Além disso, a probabilidade de início da geração de impulsos $\pi(U)$ (Equação 4.3) deve crescer apenas quando $\Theta \gg \Theta_E$, ou seja, o início da geração espontânea de impulsos deve ocorrer quando o grau de degeneração for significativamente maior do que Θ_E . Estas restrições forcem o neurônio que permanecer isolado a adentrar profundamente a região crítica antes que possa se regenerar, e permitem apenas uma regeneração parcial, já que os impulsos serão interrompidos quando $\Theta \approx \Theta_E$. Resta ainda observar que o grau de degeneração Θ_π em que ocorre o primeiro impulso não é fixo, haja vista o caráter probabilístico de $\pi(U)$.

4.2.4 Consumo de Energia

O neurônio pode encontrar-se no estado de descanso (inativo) ou no estado de geração de impulsos (ativo). Em ambos estados ele consome uma certa quantidade de energia g . Este consumo é compensado pela alimentação I proveniente de uma fonte externa, simulando processos metabólicos, e pelas reservas de energia H , atualizadas de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = I - g \quad (4.16)$$

O valor de H determina se o neurônio está vivo: com $H = 0$ o neurônio morre. O valor de g , por sua vez, é formado pelos gastos de energia para a geração de impulsos (g_1), gastos de energia devido ao transporte através da membrana (g_2) e gastos de energia para manter as reservas H (g_3):

$$g(v, \Theta, H) = g_1(v) + g_2(\Theta) + g_3(H) \quad (4.17)$$

A razão da existência de g_3 é de impedir o crescimento ilimitado das reservas, forçando o neurônio a sobreviver graças à redução no consumo. Conforme podemos observar na Figura 4.4, o gasto com a manutenção das reservas cresce rapidamente quando elas ultrapassam um certo valor normal H_N , e é calculado pela equação:

$$g_3(H) = k_{g_3} \left(\frac{H}{H_N} \right)^3, \quad k_{g_3} = \text{const.} \quad (4.18)$$

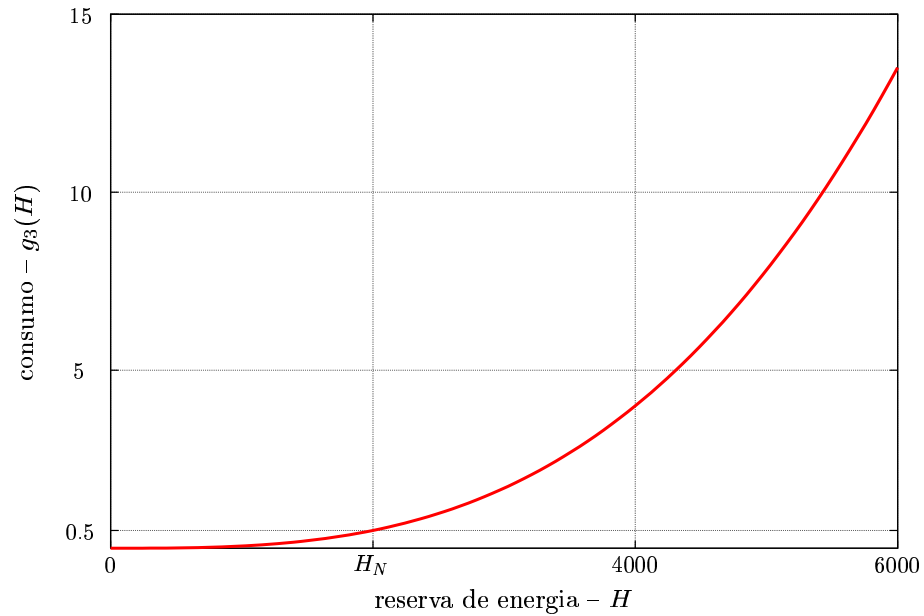


Figura 4.4: Dependência do consumo (g_3) à reserva de energia do neurônio (H)

O consumo relacionado ao transporte de elementos através da membrana é representado por g_2 (Equação (4.19)). Podemos verificar que este componente do consumo aumenta proporcionalmente ao grau de degeneração do neurônio, e que existe um valor Θ_c , a partir do qual o g_2 cresce aceleradamente, conforme mostra a Figura 4.5 na próxima página. A região de valores de $\Theta > \Theta_c$ é chamada de *região crítica*, pois o consumo torna-se tão elevado que pode rapidamente levar o neurônio à morte. A única maneira que o neurônio tem para reduzir seu consumo, é reduzindo o valor de Θ através da geração de impulsos.

$$g_2(\Theta) = \begin{cases} \frac{a_{g_2} \Theta}{\Theta_c}, & \Theta < \Theta_c; \\ a_{g_2} + b_{g_2} \Theta + c_{g_2} \Theta^2, & \Theta \geq \Theta_c, \end{cases} \quad (4.19)$$

$$a_{g_2}, b_{g_2}, c_{g_2} = \text{const.}$$

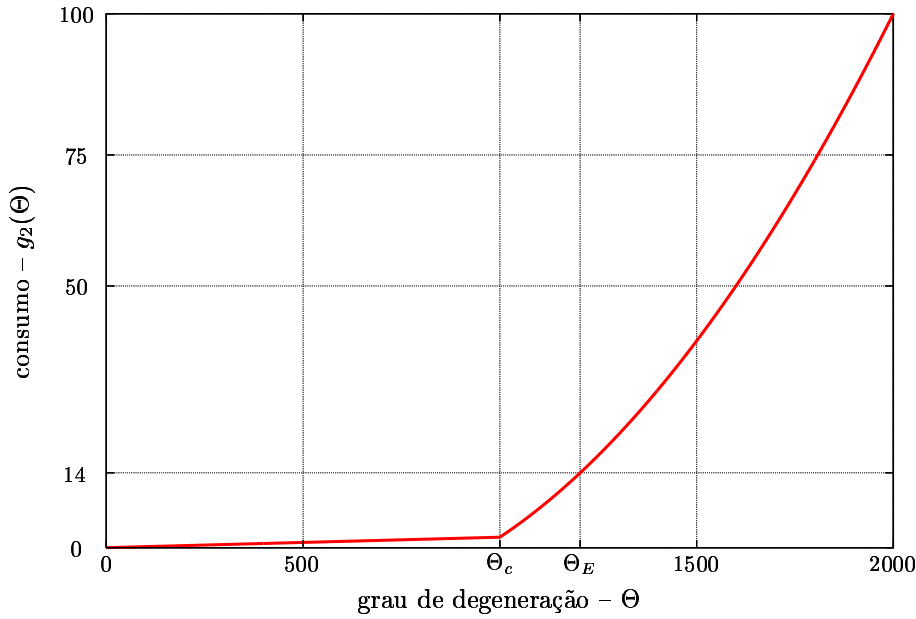


Figura 4.5: Dependência do consumo (g_2) ao grau de degeneração do neurônio (Θ)

A geração de impulsos afeta o balanço de energia do neurônio de duas maneiras: por um lado, consome diretamente energia, e por outro, contribui para a redução do consumo ao promover a regeneração do neurônio. O formato de g_1 (Equação (4.20)) está sujeito às seguintes restrições: quando $v = 0$ não há consumo para a geração de impulsos ($g_1(0) = 0$); quando $0 < v < v_{min}$ a função é indefinida, porque o neurônio não pode gerar impulsos numa frequência $v < v_{min}$ (vide Equações (4.2)–(4.4)); e finalmente, para frequências acima de v_{min} , o consumo inicialmente decresce até a frequência ótima v_{opt} , a partir do qual volta a crescer. Para ser energeticamente eficiente, o neurônio deve gerar impulsos na frequência ótima, pois é a que apresenta o melhor custo-benefício em relação à redução de Θ .

$$g_1(v) = \begin{cases} 0, & v = 0 \\ 1 + v (k_{g_1} (v - v_{opt}))^2, & v \geq v_{min}, \end{cases} \quad k_{g_1} = \text{const.} \quad (4.20)$$

A constante k_{g_1} e a Equação (4.19) devem ser ajustadas de forma que a função $g_1(v)$ satisfaça a seguinte restrição:

$$g_1(v_{min}) \ll g_2(\Theta_E) - g_2(\Theta_c), \quad (4.21)$$

pois senão seria lucrativo para o neurônio diminuir seu consumo de energia devido à ausência de geração de impulsos, e não devido à redução de Θ .

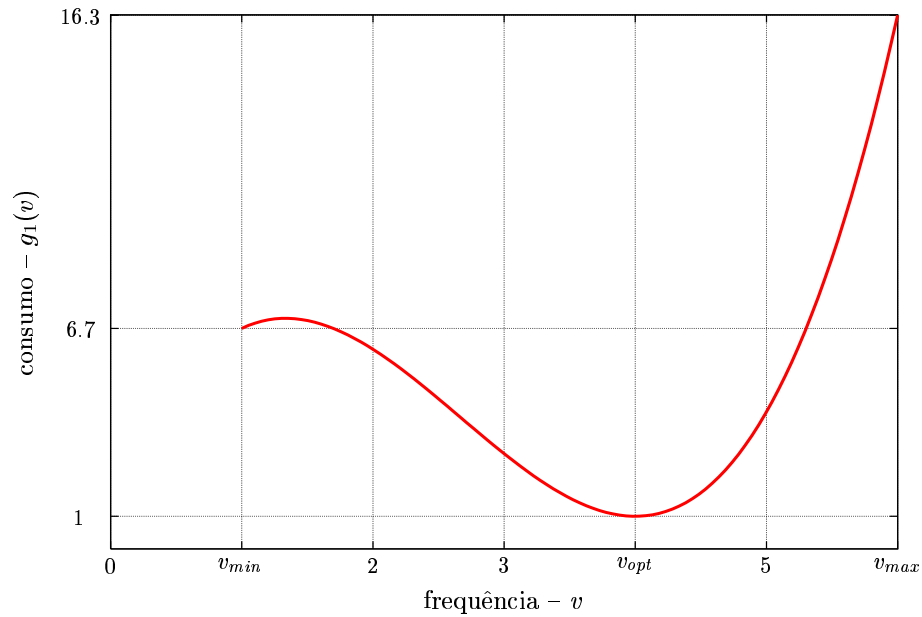


Figura 4.6: Dependência do consumo (g_1) à frequência de geração de impulsos (v)

4.2.5 Conexões Interneurais e Regra de Treinamento

Somente a geração de impulsos em alta frequência — de preferência na frequência v_{opt} — pode reduzir significativamente o consumo de energia do neurônio. Para tanto, ele precisa de excitação externa, fornecida pelas conexões interneuronais. Ajustando a condutividade destas conexões de acordo com as suas necessidades, o neurônio receptor consegue ajustar a frequência de geração de impulsos de forma que ela se aproxime de v_{opt} . Uma regra que ajusta as conexões de forma a levar o neurônio a gerar impulsos na frequência ótima é chamada de *regra ótima de treinamento*¹.

Uma conexão interneuronal pode formar-se entre dois neurônios i e j quaisquer. Durante a geração de impulsos, o neurônio emissor j transfere um potencial ao neurônio receptor i que

¹No original, *Optimal Learning Rule*.

pode facilitar ou dificultar a atividade deste, dependendo da forma da conexão: excitatória ou inibitória. O valor do potencial excitatório ou inibitório produzido por cada conexão depende do valor da condutividade ϱ da conexão e da frequência de geração de impulsos v do neurônio emissor. A magnitude de ϱ é um reflexo direto da atividade pregressa do neurônio, ou seja, é o resultado do desenvolvimento e auto-organização da rede neuroenergética: é a memória do neurônio, e, conseqüentemente, da rede.

O potencial de entrada W do neurônio é formado exclusivamente através do funcionamento das conexões interneuronais. As conexões excitatórias criam potenciais positivos W^+ e as inibitórias criam potenciais negativos W^- . Se existe uma conexão de um neurônio j para um neurônio i , então um impulso no neurônio j imediatamente aumenta/diminui o potencial do neurônio i . A dinâmica de atualização do potencial das conexões pode ser descrita pelas seguintes equações:

$$\frac{\partial W_i^+}{\partial t} = \sum_j v_j \varrho_{ji}^+ - \mu^+ W_i^+, \quad \mu^+ = \text{const}; \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial W_i^-}{\partial t} = \sum_j v_j \varrho_{ji}^- - \mu^- W_i^-, \quad \mu^- = \text{const}; \quad (4.23)$$

onde j – índice do neurônio emissor; i – índice do neurônio receptor; ϱ_{ji} – condutividade da conexão do j -ésimo ao i -ésimo neurônio; μ – constante de decaimento do potencial W ; o sobrescrito ‘+’ refere-se a conexões excitatórias e o sobrescrito ‘-’ refere-se a conexões inibitórias.

4.2.5.1 Conexões Excitatórias

A condutividade das conexões excitatórias ϱ_{ji}^+ é ajustada de forma a levar os neurônios a gerarem impulsos na frequência ótima, e é composta por dois componentes: dinâmico ϱ_{dji} (rápido), e estático ϱ_{sji} (lento):

$$\varrho_{ji}^+ = \max(0, \varrho_{dji} + \varrho_{sji}) \quad (4.24)$$

onde $\max$ – é a função de máximo, que tem por finalidade preservar o sinal da condutividade. O componente estático é formado a partir da média dos valores do componente dinâmico durante vários ciclos de geração de impulsos, e representa a memória permanente do neurônio. Sua variação ao longo do tempo é dada por:

$$\frac{\partial \varrho_{sji}}{\partial t} = k_\chi \chi(Q^\epsilon) \varrho_{dji} - \mu_s \varrho_{sji}, \quad k_\chi, \mu_s = \text{const}, \quad 0 < \mu_s < 1; \quad (4.25)$$

onde χ – função de Q^ϵ , indicando o grau de encorajamento para determinada conexão, em função da saúde do centro emocional (Seção 5.4); μ_s – taxa de decaimento do componente estático.

O componente dinâmico muda substancialmente durante o período de geração de impulsos do neurônio, sendo responsável pelo armazenamento da memória imediata do neurônio:

$$\frac{\partial \varrho_{dji}}{\partial t} = \Xi_{1j} \Xi_{2i} - \mu_d \varrho_{dji}, \quad \mu_d = \text{const}, \quad 0 < \mu_d < 1; \quad (4.26)$$

onde μ_d – taxa de decaimento do componente dinâmico, que deve ser significativamente maior do que a taxa de decaimento do componente estático, μ_s . A existência de Ξ_1 e Ξ_2 pode ser explicada do ponto de vista biológico como uma representação das reações químicas que ocorrem com os neurotransmissores e neuroreceptores no sistema “membrana pré-sináptica → fenda sináptica → membrana pós-sináptica”. Do ponto de vista energético, Ξ_1 e Ξ_2 têm a função de levar o neurônio a gerar impulsos na frequência ótima. O valor de Ξ_1 caracteriza a capacidade do neurônio emissor de modificar a condutividade das conexões (membrana pré-sináptica → fenda sináptica). Esta habilidade aumenta proporcionalmente à frequência de geração de impulsos do neurônio emissor, e cessa quando a geração de impulsos termina:

$$\frac{\partial \Xi_{1j}}{\partial t} = \gamma_1 v_j - \mu_1 \Xi_{1j}, \quad \gamma_1, \mu_1 = \text{const}; \quad (4.27)$$

O valor de Ξ_2 caracteriza a capacidade do neurônio receptor de modificar a condutividade das conexões que chegam até ele (fenda sináptica → membrana pós-sináptica) e depende da sua frequência de geração de impulsos:

$$\frac{\partial \Xi_{2i}}{\partial t} = \gamma_2 v_i (v_{opt} - v_i) - \mu_2 \Xi_{2i}, \quad \gamma_2, \mu_2 = \text{const}. \quad (4.28)$$

A geração de impulsos por parte do neurônio receptor aumenta o valor de Ξ_2 se a frequência for menor do que a ótima, e diminui Ξ_2 no caso contrário. A geração prolongada em frequências acima da ótima podem levar Ξ_2 a valores negativos, fazendo com que ϱ_d assumam valores negativos por algum tempo. Desta forma, quando a frequência difere da ótima por muito tempo, Ξ_2 muda a condutividade da conexão de forma a levar a frequência para valores mais próximos de v_{opt} . Na ausência de impulsos, a capacidade de modificar a condutividade deixa de existir.

4.2.5.2 Conexões Inibitórias

As conexões inibitórias são formadas a partir das conexões excitatórias, de acordo com um evento probabilístico de transformação da conexão: $\varrho_{ji}^+ \rightarrow \varrho_{ji}^-$. O evento de transformação somente é possível quando v_j e v_i são maiores do que v_{min} e quando Θ_i tem valores muito baixos ($\Theta_i \approx \Theta_{min}$).

A probabilidade de transformação de uma conexão excitatória entre os neurônios j e i , em uma conexão inibitória, $(\pi_{\varrho_{ji}})$, é dada por

$$\pi_{\varrho_{ji}} = \alpha_1 v_j (v_i - v_{min})^{\alpha_2} \left(\frac{\Theta_{min}}{\Theta_i - 0.5 \Theta_{min}} \right)^{\alpha_3}, \quad v_j, v_i > v_{min} \quad (4.29)$$

$$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 = \text{const}, \quad 0 < \alpha_1 < 1, \quad \alpha_2 > \alpha_3 > 3,$$

sendo que as constantes devem ser escolhidas de tal maneira que a transformação possa ocorrer antes que $\Theta_i = \Theta_{min}$, isto é, antes que a geração de impulsos torne-se impossível devido ao crescimento do limiar Π_0 (Equação (4.11)).

Do ponto de vista energético, a razão da existência das conexões inibitórias está na necessidade de interromper a geração de impulsos em neurônios já regenerados, que são forçados a gerar impulsos devido às excitações provenientes de suas conexões, consumindo energia desnecessariamente. Para interromper a geração de impulsos, a condutividade da conexão inibitória recebe imediatamente após a transformação um valor alto, que não muda ao longo do tempo. O valor de ϱ_{ji}^- deve ser tal que garanta a propriedade da alternatividade, ou seja: na presença de ϱ_{ji}^- e com $v_j \approx v_{opt}$ forma-se um potencial negativo W_i^- grande o suficiente para impedir que o neurônio i gere impulsos com quaisquer valores de W_i^+ que consiga obter.

4.2.6 Saúde do Neurônio

A saúde Q do neurônio depende da quantidade de reservas de energia (H) e de sua variação ou tendência (H'). A dependência de Q é muito maior em relação a H' do que em relação a H , o que significa dizer que o crescimento/decréscimo das reservas é mais importante do que sua quantidade, ou seja, a saúde do neurônio será tanto melhor quanto mais reservas ele tiver, e quanto mais acentuadamente elas crescerem.

Quando $Q \leq Q_{min}$ a saúde é a pior possível e o neurônio morre. Quando $Q \geq Q_{max}$, o neurônio pode se dividir, dando origem a dois novos neurônios: ambos com $\Theta = 0$, metade das reservas de energia do neurônio original, além de novas conexões com condutividade igual a zero. A geração de novos neurônios ocorre principalmente durante a formação do estado inicial da rede, quando ainda não estão estabelecidos os regimes de sono e vigília. Novos neurônios são gerados apenas para substituir neurônios que morreram, a fim de evitar a redução do número de neurônios da rede. Quando um neurônio morre, a energia que lhe seria fornecida é redistribuída para a rede, pois todos neurônios recebem uma quantidade igual de energia a cada intervalo de tempo.

4.3 Rede Neuroenergética

Nesta seção analisamos três questões: 1) a auto-organização inicial dos neurônios, isto é, a formação de uma rede interligada a partir de um conjunto desorganizado de neurônios; 2) o funcionamento cíclico da rede, com os regimes de sono e vigília; e 3) a influência exercida pela excitação externa no consumo da rede. Estas questões são analisadas do ponto de vista energético, da necessidade de redução no consumo de energia, sem a preocupação de identificar ou obter funcionalidades inteligentes. Procuramos mostrar apenas que as propriedades do neurônio tornam possível a auto-organização, transformando um conjunto desordenado de neurônios em uma rede, reduzindo desta forma o consumo, e propiciando uma maneira econômica de funcionamento. A rede que surge deste processo possui uma importante propriedade: pode reduzir ainda mais seu consumo de energia se fornecermos excitação adicional a alguns neurônios. Neste momento, não estamos interessados nas origens da excitação, nem nas suas conseqüências indiretas na organização da rede. Queremos apenas comprovar que ela traz vantagens do ponto de vista energético. Mais adiante veremos que o surgimento das funções inteligentes do agente neuroenergético está diretamente ligado à busca por fontes externas de excitação.

4.3.1 Auto-organização da Estrutura Base

Para examinar o processo de formação da estrutura base, é conveniente partir de um estado inicial simples, no qual não existe interação entre os neurônios e não há condições para a geração de impulsos. Portanto vamos assumir que inicialmente a condutividade ρ de todas as conexões é igual a zero, o potencial de entrada W é inexistente, e o grau de degeneração dos neurônios é pequeno ($\Theta < \Theta_c$), de forma que a excitabilidade é praticamente nula.

Com o passar do tempo, o grau de degeneração aumenta, e a partir de um valor $\Theta \gg \Theta_E$, o neurônio inicia a geração de impulsos na região de exaltação (em baixa frequência, v_{min}). Ele consegue gerar impulsos porque o aumento de Θ implica na queda do limiar $\Pi_0(\Theta)$ (Equação (4.11)) e conseqüentemente no aumento da probabilidade de geração de impulsos $\pi(U)$ (Equação (4.3)). Com a geração de impulsos, o processo se inverte: Θ diminui e Π_0 aumenta, interrompendo a geração quando

$$\Pi_0(\Theta_E + \Delta) + \Pi_S = -\Pi_E, \quad \Delta > 0.$$

O valor de Θ para o qual a geração é interrompida é um pouco maior (Δ) do que Θ_E , devido ao surgimento do limiar estático Π_S . É natural supor uma distribuição aleatória no grau

de degeneração dos neurônios, de forma que a degeneração média dos N neurônios de uma rede ($\bar{\Theta} = \sum_{i=1}^N \Theta_i/N$) estabilize em um valor um pouco acima de Θ_E , a frequência média de geração de impulsos ($\bar{v} = \sum_{i=1}^N v_i/N$) seja baixa, e o consumo de energia bastante elevado. Este é o *estado inicial*.

Na primeira fase da auto-organização da rede ocorre a formação de conexões excitatórias entre pares de neurônios i e j devido ao fato de que a geração simultânea de impulsos leva ao crescimento da condutividade ϱ_{ji} (Equação (4.26)) e, conseqüentemente, ao surgimento do potencial excitatório W^+ . Com o surgimento de W^+ , a geração deixa de ser totalmente espontânea, iniciando para valores menores de Θ e reduzindo Θ cada vez mais. Esta fase é caracterizada por séries periódicas de geração de impulsos em baixa frequência, com aumento na condutividade das conexões, e por intervalos de inatividade, nos quais a condutividade ϱ_{ji} diminui (Equação (4.25)). Para que a rede possa se auto-organizar, é necessário que o crescimento da condutividade durante o período de geração simultânea seja maior do que seu decréscimo durante os intervalos, o que pode ser alcançado ajustando-se as constantes de decaimento da condutividade (Equações (4.25)–(4.26)).

A passagem para a segunda fase do processo de auto-organização se dá quando um neurônio consegue gerar impulsos em alta frequência (ultrapassando o limiar de refração), devido ao aumento gradual na condutividade de suas conexões. Com uma frequência maior, aumenta o auxílio (W^+) prestado por este neurônio aos outros com os quais tem conexões, de forma que eles também conseguem ultrapassar o limiar Π_R , e gerar impulsos em alta frequência. Inicia-se assim uma reação em cadeia em que a frequência cresce, a redução de Θ é cada vez mais acentuada, e a condutividade das conexões aumenta ainda mais, provocando uma explosão de atividade.

Quando o valor de Θ de algum neurônio se aproxima de Θ_{min} , surgem as condições necessárias para a transformação de conexões excitatórias em inibitórias (Equação (4.29)), e a rede começa a ser separada em grupos de auxílio mútuo (GAMs). O aparecimento do potencial inibitório W^- , a considerável redução de Θ e o aumento no limiar estático Π_S levam ao fim da geração de impulsos em alguns neurônios, e a conseqüente redução em W^+ interrompe a atividade em todos os neurônios. Desta forma, a segunda fase da auto-organização se caracteriza pela geração de impulsos em alta frequência ($v \approx v_{opt}$), e por prolongados intervalos de descanso, em que o grau de degeneração aumenta.

O aumento gradual do número de conexões inibitórias dá início à alternatividade na geração de impulsos (propriedade da alternatividade), pois a geração de impulsos por parte dos neurônios de um GAM impede que outros entrem em atividade. O número de neurônios nos GAMs decresce, e os grupos organizam uma fila cíclica na qual se alternam na geração de impulsos em alta frequência

e regeneração de seus neurônios.

O processo de auto-organização da rede completa-se quando não há mais condições para a criação de novas conexões inibitórias. A transformação de uma conexão excitatória em inibitória está sujeita à condição de que o neurônio deve ter um grau de degeneração baixo ($\Theta_i \approx \Theta_{min}$) e estar gerando impulsos em alta frequência ($v_i \approx v_{opt}$). Mas o surgimento de cada conexão inibitória diminui a probabilidade de formação de outras, pois gera um potencial negativo, dificultando a geração em alta frequência. A quantidade de conexões inibitórias determina o tamanho dos GAMs: quanto mais conexões inibitórias, menores serão os GAMs, e menor será o auxílio mútuo entre os neurônios do grupo. A partir de um certo número de conexões inibitórias, o neurônio só consegue gerar impulsos numa frequência próxima à mínima quando $\Theta \approx \Theta_{min}$. Esta é a razão do impedimento de novas transformações, e a indicação de que a auto-organização da estrutura base está completa.

4.3.2 Alternância entre os Regimes de Sono e Vigília

Uma vez formada a estrutura base, a rede neuroenergética opera alternadamente em dois regimes: sono e vigília. Cada regime de vigília é seguido por um regime de sono, formando o que chamamos de *ciclo diário* da rede.

Como vimos, ao final da formação da estrutura base os neurônios já estão interligados através de conexões excitatórias e inibitórias. Um grupo de neurônios contendo apenas conexões excitatórias entre si, é chamado de grupo de auxílio mútuo, ou GAM. Durante o regime de sono, os GAM entram em atividade de forma alternada e cíclica, levando a uma profunda regeneração de todos os neurônios da rede. Entendemos por atividade a geração de impulsos em alta frequência por parte dos neurônios do grupo. A alternatividade se deve ao fato de que um GAM ativo impede, através de conexões inibitórias, a atividade de outros. Além disso, um grupo não pode permanecer ativo por muito tempo, devido ao crescimento do limiar estático Π_S que leva os neurônios ao estado latente. Quando a atividade de um GAM é interrompida, o próximo da fila (geralmente aquele com maior excitabilidade) começa a gerar impulsos. Este procedimento se repete várias vezes, até que o grau de degeneração da maioria dos neurônios esteja próximo de Θ_{min} e impeça a reinicialização da fila.

A Figura 4.7 na página seguinte mostra a relação entre n GAM de uma rede durante o regime de sono. GAM_n é o grupo ativo gerando impulsos na frequência $v \approx v_{opt}$, o grupo GAM_{n-1} está no estado de facilitação pós-tetânica ($\Pi_S < 0$). Os grupos GAM_{n-2} , GAM_{n-3} , ...,

GAM_2 , GAM_1 , estão no estado latente ($\Pi_S > 0$) e os maiores valores de Π_S estão nos grupos que recentemente estiveram ativos. O grupo GAM_n permanece ativo até que o valor de Π_S em seus

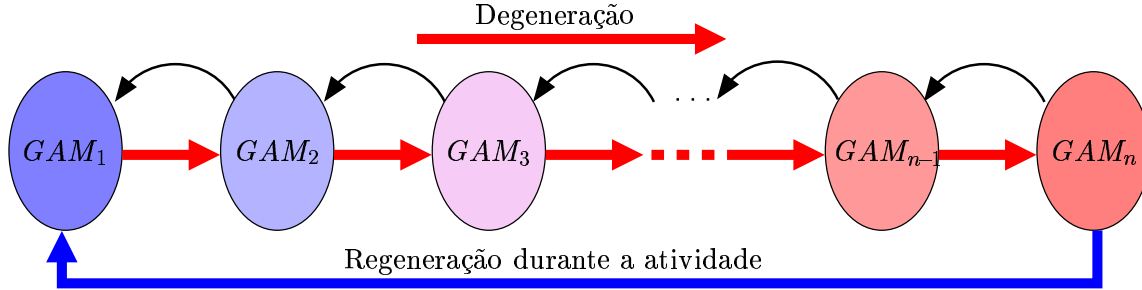


Figura 4.7: Diagrama da relação entre os GAM no regime de sono, formando uma fila circular para sua regeneração.

neurônios cresce de forma a impedir a geração de novos impulsos. Ao final da atividade, GAM_n vai ocupar a posição de GAM_1 , este a posição de GAM_2 , e assim por diante, de forma que, na Figura 4.7, os grupos estão em ordem decrescente de limiar estático (da esquerda para a direita). A atividade do grupo GAM_n pode criar excitação suficiente no grupo GAM_{n-1} de forma que este também entre em atividade, caso não haja conexões inibitórias entre eles. No caso de existirem conexões inibitórias, o grupo GAM_{n-1} não consegue ultrapassar o limiar de refração Π_R , e apenas gera impulsos na frequência mínima, entrando em atividade somente quando o grupo GAM_n pára.

Os neurônios dos grupos ativos regeneram-se à medida em que geram impulsos, e no período de latência eles voltam a se degenerar. Para que o regime de sono seja vantajoso do ponto de vista energético, é necessário que as constantes das equações de Π_S (Equação (4.8)), $\Delta\Theta$ (Equação (4.1)) e π_{eji} (Equação (4.29)) sejam ajustadas de forma que a regeneração durante o período de atividade seja maior do que a degeneração no período de latência. Desta forma, após vários ciclos de atividade – latência, o grau de degeneração dos neurônios estará próximo de Θ_{min} , e o limiar Π_0 impedirá que eles gerem impulsos, mesmo com $\Pi_S < 0$. No momento em que um grupo não puder entrar em atividade devido ao limiar Π_0 , a fila de GAM é desfeita e a rede entra no regime de vigília.

No início do regime de vigília a saúde média dos neurônios é muito boa, pois as reservas de energia H estão altas, e o consumo é pequeno. O limiar estático torna-se praticamente nulo e a excitabilidade dos neurônios é baixa, devido ao limiar Π_0 . Com o passar do tempo, o grau de degeneração aumenta, e a partir de certo ponto o consumo torna-se maior do que a entrada de energia, reduzindo as reservas do neurônio. A saúde se deteriora e o neurônio precisa gerar impulsos para não atingir um estado letal. Quando a geração espontânea torna-se possível, os

neurônios geram impulsos na frequência mínima e forma-se na rede um potencial que é capaz de levá-la novamente ao regime de sono, fechando o ciclo.

A Figura 4.8 mostra o comportamento de algumas variáveis de um neurônio durante os regimes de sono e vigília. Vale observar que a figura mostra, no regime de sono, o resultado obtido ao longo de vários ciclos de atividade – latência. Quando **(a)** o neurônio entra no regime de vigília, ele está quase completamente regenerado ($\Theta \approx \Theta_{min}$), com baixo consumo de energia (g) e sem gerar impulsos (v). Com o passar do tempo, ele se degenera **(b)** o consumo aumenta e o limiar puro (Π_0) cai acentuadamente até que **(c)** o neurônio consiga gerar impulsos na frequência mínima. Outros neurônios na mesma situação produzem um potencial resultante U , permitindo que **(d)** o neurônio gere impulsos em alta frequência e a rede entre no regime de sono. Há uma explosão de atividade, com $v \approx v_{opt}$, e uma leve redução no consumo devido à diminuição de Θ . Repetidas gerações de impulso, seguidas por períodos de latência (enquanto outros grupos estão ativos), levam a **(e)** uma regeneração quase total do neurônio, de forma que o limiar Π_0 cresce e **(f)** impede a geração de novos impulsos. O mesmo acontecendo em outros neurônios acaba com o potencial, de forma que nenhum GAM consegue entrar em atividade, e a rede volta ao regime de vigília **(a)**.

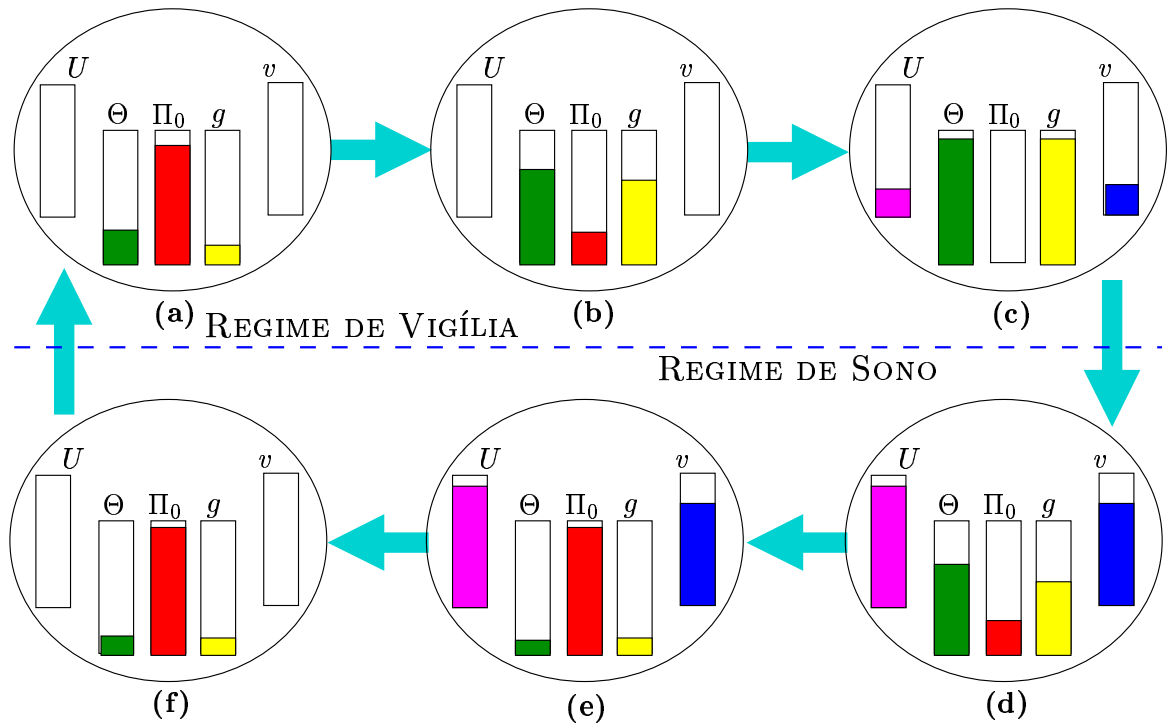


Figura 4.8: Alterações no neurônio ao longo de um ciclo diário.

4.3.3 Consumo de Energia durante o Ciclo Diário

O consumo de energia do neurônio depende do grau de degeneração, da frequência de geração de impulsos e do valor das reservas (Equação (4.17)). Durante o *ciclo diário* da rede, que vai de um regime de vigília a outro, o consumo tem uma grande variação, enquanto a alimentação permanece constante. A Figura 4.9 mostra a variação do grau de degeneração médio ($\bar{\Theta}$) e do valor médio das reservas ($\bar{H}$) ao longo de um ciclo diário. A entrada de energia para o neurônio é mínima, a tal ponto que, se fosse reduzida, acarretaria eventos letais.

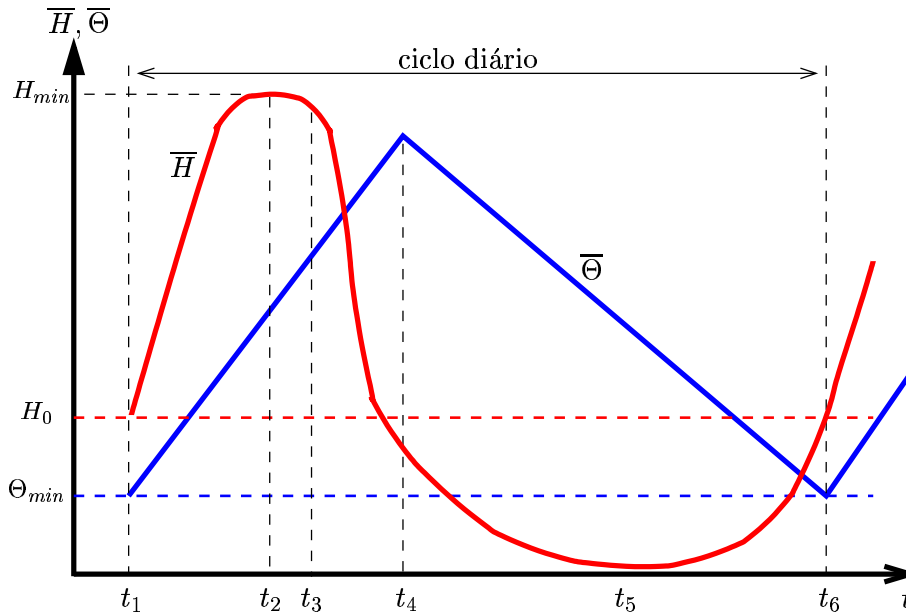


Figura 4.9: Variação do grau de degeneração médio ($\bar{\Theta}$) e do valor médio das reservas ($\bar{H}$) de uma rede neuroenergética ao longo de um ciclo diário, na ausência de excitação externa.

O ciclo diário da rede inicia quando a rede “acorda” no instante t_1 e termina no instante t_6 quando ela entra novamente no regime de vigília. O grau de degeneração médio no início do regime de vigília é próximo de Θ_{min} , e as reservas de energia estão em torno de H_0 . No intervalo $[t_1, t_3]$ a rede está no regime de vigília, o grau de degeneração dos neurônios cresce linearmente ao longo do tempo, e as reservas de energia variam basicamente de acordo com a dependência de $g_2(\Theta)$ (Figura 4.5 na página 72). No momento t_2 o consumo é igual à entrada de energia e as reservas do neurônio estão no seu ponto máximo. A partir do ponto t_3 torna-se possível a geração espontânea de impulsos ($\Theta(t_3) = \Theta_E$). No ponto t_4 a fila de GAM já está formada e os neurônios começam a reduzir seu grau de degeneração — a rede entrou no regime de sono. No intervalo

$[t_3, t_4]$, um pouco antes de “dormir”, a rede tem o maior consumo de energia. O regime de sono tem um intervalo $[t_4, t_5]$ no qual as reservas continuam a diminuir devido aos altos valores de Θ e à geração de impulsos, e um intervalo $[t_5, t_6]$ em que elas voltam a crescer. No ponto t_5 em que ocorre a mudança no sinal de H' , as reservas atingem seu ponto mínimo, e os neurônios estão em situação crítica, com grande probabilidade de eventos letais.

A viabilidade da rede neuroenergética sob condições de limitação de energia depende da capacidade de seus neurônios de entrar no regime de sono sem que ocorram eventos letais. O ponto crítico neste sentido é t_5 , em que o consumo é máximo, mas a garantia contra eventos letais é definida pela quantidade de reservas no ponto t_2 , que deve estar acima de um mínimo $\overline{H}_{min}$, de forma que $\overline{H}(t_5) > 0$. Como o evento de morte do neurônio é até certo ponto probabilístico, e pode ocorrer para pequenos valores positivos de H , é necessário que no instante t_2 o valor das reservas esteja acima do ponto H_{min} , para que $\overline{H}(t_5)$ seja um pouco maior do que zero. Desta forma, o problema de sobrevivência dos neurônios na rede transforma-se no problema de acumular reservas suficientes durante o regime de vigília, para permitir a entrada no regime de sono sem que ocorram eventos letais. Ou seja, a sobrevivência dos neurônios é determinada pela condição

$$\overline{H}(t_2) > \overline{H}_{min}. \quad (4.30)$$

É importante observar que a quantidade de energia recebida pelo neurônio não entra de maneira direta na sua condição de sobrevivência, mas apenas indiretamente, no acúmulo de reservas durante o ciclo diário. A quantidade necessária de reservas pode ser obtida, mesmo com pouca energia, se o neurônio prolongar o tempo de armazenamento de energia (H' positivo), isto é, se ele reduzir a velocidade de degeneração durante o período de crescimento das reservas, no regime de vigília (intervalo $[t_1, t_2]$). A redução do grau de degeneração pode ser obtida se os neurônios conseguirem gerar impulsos isolados. Conforme indicamos na Seção 4.2.1, os impulsos isolados são vantajosos porque promovem uma redução significativa no grau de degeneração com um consumo de energia relativamente pequeno.

A Figura 4.10 na página seguinte mostra a variação do nível médio das reservas e do grau de degeneração médio de uma rede neuroenergética, para o alongamento do ciclo diário, devido à presença de excitação externa. Para efeito de comparação, os gráficos de $\overline{\Theta}(t)$ e $\overline{H}(t)$ na ausência de excitação externa foram transferidos da Figura 4.9, e estão representados em linha pontilhada.

A geração de impulsos isolados é estimulada pelo fluxo de excitação externa aos neurônios, representado por σ . Existe um valor ótimo de excitação σ_{opt} que permite à rede ter o comportamento ilustrado na Figura 4.10. A quantidade de impulsos gerados na rede devido a σ_{opt} deve ser tal

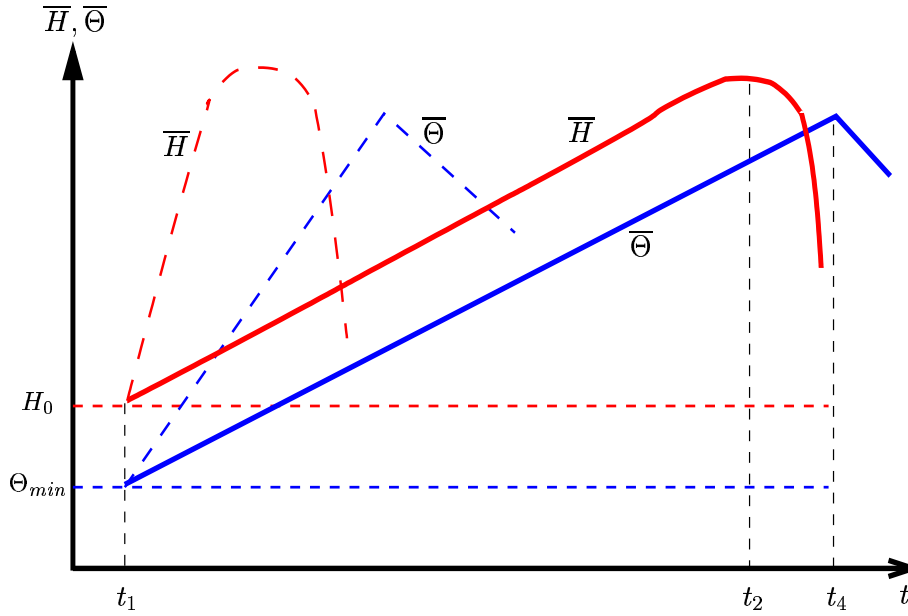


Figura 4.10: Variação do grau de degeneração médio ($\bar{\Theta}$) e do valor médio das reservas ($\bar{H}$) de uma rede neuroenergética, para o alongamento do ciclo diário devido à presença de excitação externa.

que não permita um efeito cumulativo, ou seja, que não gere um potencial excitatório W^+ que cause a geração de impulsos em outros neurônios, levando a rede a entrar no regime de sono prematuramente. Do ponto de vista energético isto seria vantajoso, pois o consumo de energia seria reduzido, mas do ponto de vista do desenvolvimento de funções inteligentes, isto é ruim, pois é apenas no regime de vigília que o agente neuroenergético pode sofrer as influências do ambiente e atuar nele. Por isso, durante a construção do agente, especialmente na escolha das constantes das equações, devem ser introduzidas limitações de forma que σ_{opt} seja alcançado apenas com grande esforço.

4.4 Resultados Experimentais

Nesta seção discutimos a implementação computacional da rede neuroenergética apresentada nas seções anteriores. A principal ênfase da implementação está na comprovação da viabilidade da rede do ponto de vista energético, ou seja, na sua capacidade de reduzir o consumo de energia através da auto-organização. A primeira etapa da atividade de implementação consiste em definir os valores das constantes, moldando assim as equações que regem o comportamento dos neurônios. O principal cuidado a ser tomado nesta atividade é o de manter a forma geral das equações, definida

pelas restrições a que o neurônio está sujeito. Segundo (Emelyanov-Yaroslavsky & Potapov, 1992b) e também de acordo com nossos próprios testes, o modelo proposto não é muito sensível à variação de seus principais parâmetros, $v(U)$, Π_0 , $\Pi_S\{v, t\}$, $\Theta\{v, t\}$, $g_1(v)$, $g_2(\Theta)$, desde que mantida a forma geral das dependências entre as equações.

Uma vez definidas as equações, partimos para a etapa de testes, que foi dividida em três fases: 1) formação e estabilização do estado inicial da rede, no qual os neurônios não possuem conexões entre si e somente geram impulsos em baixa frequência, na região de exaltação, com alto consumo de energia; 2) auto-organização da rede através da formação de conexões excitatórias e inibitórias, com o surgimento dos regimes de sono e vigília, e significativa redução no consumo; e 3) o alongamento do regime de vigília graças ao fornecimento de excitação externa aos neurônios.

4.4.1 Decisões de Projeto

O sistema foi implementado na linguagem JavaTM (JDK 1.4) e os resultados verificados através da geração de gráficos da variação dos principais parâmetros dos neurônios e da rede ao longo do tempo. A representação do tempo é discreta, isto é, os parâmetros dos neurônios são atualizados a cada unidade de tempo $t = 1$, que corresponde a um passo ou ciclo da rede. A duração de t determina o grau de simplificação do neurônio, e foi definida como sendo igual a τ_{max} (Figura 4.1 na página 64), de forma que a intensidade de geração de impulsos do neurônio é determinada pelo número de impulsos gerados no intervalo t .

A conectividade dos neurônios, isto é, a quantidade de conexões de cada neurônio, é determinada em função da quantidade de neurônios da rede, e não de maneira fixa. A escolha do número de neurônios e de sua conectividade deve levar em conta o esforço computacional envolvido, mas há outros requisitos a serem satisfeitos. Conforme vimos nas seções anteriores, o problema de redução no consumo é resolvido, em primeiro lugar, devido à organização do regime de sono, e em segundo lugar, devido à organização do sistema de geração de excitação, ou seja, dos grupos neurais da memória. O regime de sono é caracterizado pela interação de grupos de auxílio mútuo, de composição aleatória, e sem conexões inibitórias entre seus neurônios. A composição dos GAM não é fixa, pois os neurônios podem migrar de um para outro ou participar de mais de um ao mesmo tempo. Para que isto ocorra, é necessário que as conexões entre os neurônios dos GAM não sejam muito fortes, ou seja, durante o regime de sono devemos impedir a formação de conexões fortes entre neurônios, que caracterizariam a formação de elementos de memória, mas que seria uma memória não relacionada ao ambiente externo, uma memória sobre “nada”. Esta necessidade

de conexões fracas indica a necessidade de grandes grupos neurais para a formação do regime de sono, e é um fator determinante na escolha do número de neurônios e de sua conectividade. Nesta implementação utilizamos uma rede com 200 neurônios, tendo cada um 50 conexões escolhidas de maneira aleatória.

4.4.1.1 Algoritmos Principais

A fim de auxiliar na compreensão do funcionamento da rede neuroenergética, apresentamos a seguir os principais algoritmos que descrevem seu funcionamento. Apesar de bastante simples, estes algoritmos procuram evidenciar a *ordem* em que as variáveis do neurônio devem ser atualizadas, uma vez que há grande interdependência entre elas, e a atualização na ordem incorreta pode acarretar erros. O primeiro algoritmo demonstra o que deve ser feito pela rede como um todo, a cada intervalo de tempo t ; o segundo algoritmo mostra em que ordem são atualizadas as variáveis de um neurônio; e o terceiro algoritmo mostra a ordem de cálculo das variáveis das conexões do neurônio. As conexões precisam ser atualizadas depois das variáveis dos neurônios (e não no mesmo laço do programa) pois dependem dos valores destas, especialmente da frequência de geração de impulsos v .

Algoritmo 1 Intervalo de Tempo

Entrada: Quantidade de energia a ser distribuída igualmente por todos os neurônios da rede

Saída: Quantidade de energia consumida por todos os neurônios da rede

if há neurônios mortos **then**

Procura neurônios com $Q > Q_{max}$ e divide-os para que substituam os mortos

end if

Calcula a quantidade I de energia a ser recebida por cada neurônio

for cada neurônio n da rede **do**

Atualiza Variáveis de n

end for

for cada neurônio n da rede **do**

Atualiza Conexões de n

end for

Retorna o consumo total de energia da rede

Algoritmo 2 Atualiza Variáveis de um Neurônio

Entrada: Quantidade de energia I recebida pelo neurônio**Saída:** Quantidade de energia consumida pelo neurônioCalcula o grau de degeneração Θ Calcula o limiar estático Π_s Calcula o limiar puro Π_0 Calcula o potencial resultante U Calcula a frequência de geração de impulsos v Calcula o consumo de energia $g(v, \Theta, H)$ Atualiza o valor das reservas de energia $H = H + I - g$ Calcula a saúde do neurônio Q **if** $Q < Q_{min}$ **then**

Neurônio morre

end if

Algoritmo 3 Atualiza Conexões de um Neurônio

for cada conexão do neurônio **do** **if** conexão é excitatória **then** **if** número de conexões inibitórias $\geq$ limite **then** Calcula probabilidade de transformação da conexão excitatória em inibitória $\pi_{\varrho_{ji}}$ **if** $\pi_{\varrho_{ji}} \geq$ valor aleatório no intervalo $[0, 1]$ **then**

transforma conexão em inibitória

end if **end if** **if** conexão **não** foi transformada em inibitória **then** Calcula o valor de Ξ_{1j} e Ξ_{2i} Calcula o componente dinâmico da condutividade $\varrho_{d_{ji}}$ Calcula o componente estático da condutividade $\varrho_{s_{ji}}$ Calcula a condutividade da conexão ϱ_{ji}^+ **end if** **end if****end for**Calcula o valor do potencial excitatório W^+ Calcula o valor do potencial inibitório W^-

4.4.1.2 Grau de Degeneração

O grau de degeneração do neurônio varia entre 0 e 2000, mas na prática estes limites dificilmente são atingidos, devido a outras restrições. Se a redução de Θ devido à geração de impulsos for muito rápida, a duração do regime de sono é pequena e aumentam as chances de que nem todos os neurônios tenham a chance de se regenerar. Definindo $\vartheta_d = 1$, $k_\theta = 3$ e $\vartheta_l = -30$, obtemos um aumento de Θ em uma unidade a cada intervalo de tempo em que o neurônio está inativo. Quando o neurônio gera impulsos na frequência mínima, Θ é reduzido em 2 a 3 unidades, e na frequência ótima, em 12 a 17 unidades. O último impulso da série reduz Θ em mais 30 unidades. Podemos então reescrever a Equação (4.1), que determina a variação de Θ ao longo do tempo, da seguinte maneira:

$$\Theta(t) = \Theta(t-1) + \begin{cases} \Delta\Theta, & \text{durante uma série de impulsos;} \\ \Delta\Theta - 30, & \text{no último impulso da série;} \end{cases} \quad (4.31)$$

$$\Delta\Theta = 1 - \left(3 + \frac{\Theta(t-1)}{\Theta_c}\right) v(t-1). \quad (4.32)$$

4.4.1.3 Geração de Impulsos

Definimos a frequência mínima de geração de impulsos como $v_{min} = 1$; a frequência ótima como $v_{opt} = 4$; e a frequência máxima $v_{max} = 6$. O limiar de exaltação, a partir do qual o neurônio consegue gerar impulsos espontaneamente, é $\Pi_E = -2000$, e o limiar de refração $\Pi_R = 1000$. Com $\beta = 0.017$ (Equação (4.3)) o neurônio só consegue iniciar a geração de impulsos quando o potencial aproxima-se de zero ($U \approx -200$), o que na ausência de excitação W implica num alto grau de degeneração ($\Theta \approx 1600 \gg \Theta_E$); e $\lambda = 0.00015$ (Equação (4.4)) garante que a frequência ótima só pode ser atingida com $U \approx 8000$, ou seja, com excitação proveniente de outros neurônios. Desta forma temos que a frequência de geração de impulsos $v = v_0(U)\pi(U)$ (Equação (4.2)) é dada por:

$$\pi(U) = \begin{cases} 1, & U \geq 0; \\ 1, & U \geq -2000, \quad v \neq 0; \\ \text{sign}(e^{0.017U} - \xi), & \text{cc.} \end{cases} \quad (4.33)$$

$$v_0(U) = \begin{cases} 0, & U < -2000; \\ 1, & -2000 \leq U \leq 1000; \\ 1 - 5e^{(-0.00015(U-1000))}, & U > 1000. \end{cases} \quad (4.34)$$

4.4.1.4 Limiar Estático

A Figura 4.11 mostra a variação do limiar estático em um neurônio de uma rede com os regimes de sono e vigília já estabelecidos. Podemos observar dois períodos de geração de impulsos, e a interrupção destes devido ao crescimento de Π_S , que varia no intervalo de $[-1000, 4000]$, aproximadamente. O crescimento de Π_S de zero até $\Pi_{S_c} = 400$ ocorre lentamente, e a partir daí $\Pi_S = \Pi_{S_{max}} = 4000$. O estado latente apresenta um decréscimo lento de Π_S no início, e mais rápido à medida em que Π_S se aproxima de zero, tendo uma duração de $\Delta t \approx 50$. O período de facilitação pós-tetânica ($\Pi_S < 0$) tem duração de $\Delta t \approx 20$. Sendo as constantes $k_s = 0.5$ e $l_s = 0.4$ podemos reescrever a Equação (4.8):

$$\begin{cases} \Pi_S(t) = 0.5 (\Psi(t) + \Pi_S(t-1)), & \Pi_S(t-1) < 400, \quad v \neq 0; \\ \Pi_S(t) = 4000, & \Pi_S(t-1) \geq 400, \quad v \neq 0; \\ \Pi_S(t) = \Pi_S(t-1) - 0.4 R(\Pi_S(t-1)) \Psi(t), & v = 0, \end{cases} \quad (4.35)$$

As funções auxiliares para o cálculo do limiar estático, $R(\Pi_S)$ (Equação (4.10)) e $\Psi\{\Pi_S, v\}$ (Equação (4.9)), têm as constantes definidas como $k_r = 500, l_r = 2$ e $k_\psi = 2, l_\psi = 0.05, m_\psi = 0.1$, respectivamente.

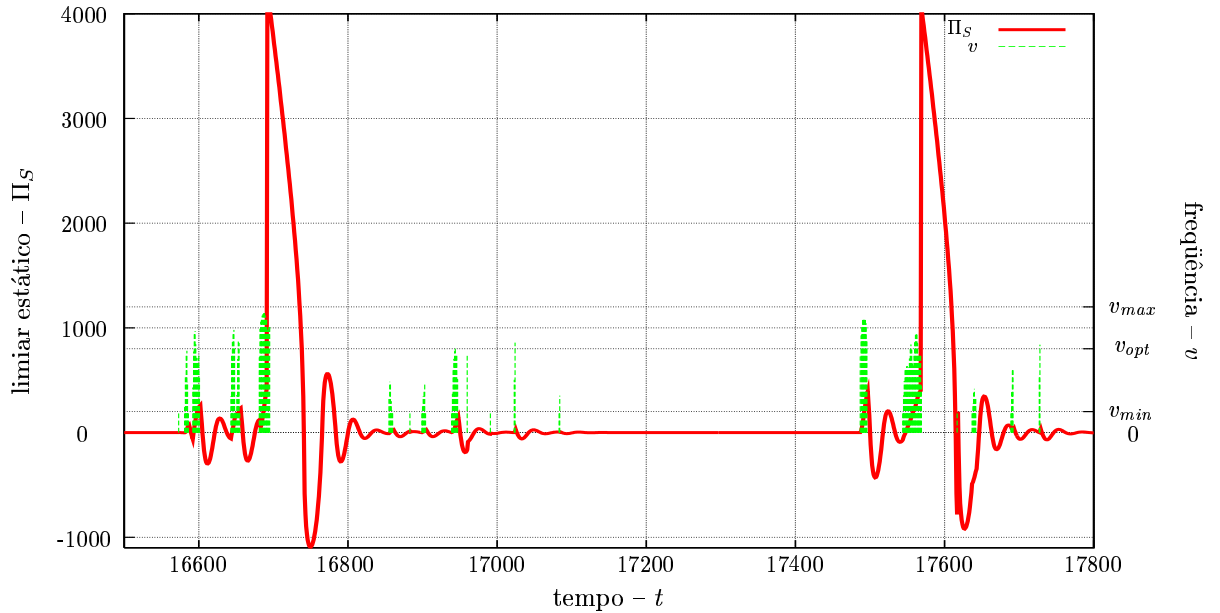


Figura 4.11: Variação do limiar estático Π_S e da frequência de geração de impulsos v ao longo do tempo, num neurônio com conexões excitatórias e inibitórias.

4.4.1.5 Limiar Puro

A variação do limiar puro Π_0 depende unicamente do grau de degeneração do neurônio. Para valores de Θ no intervalo $[0, \Theta_{min} = 150[$, $\Pi_0 = \Pi_{0_{max}} = 10^5$, impedindo a geração de impulsos no neurônio. No intervalo $[\Theta_{min}, \Theta_c = 1000]$ o limiar decresce lentamente, de aproximadamente 4300 a 3200. O ponto Θ_c é crítico porque o consumo de energia do neurônio começa a aumentar, e Π_0 decresce acentuadamente. A partir do ponto $\Theta_E \approx 1200$ o neurônio pode gerar impulsos espontaneamente, porque $\Pi_0(\Theta_E) = -\Pi_E = 2000$. O limiar continua caindo até o ponto $\Theta_{max} = 1650$, a partir do qual $\Pi_0 = 0$. Sendo $k_\phi = 10^3$, $l_\phi = 10^{-3}$ as constantes da Equação (4.11), podemos reescrevê-la como:

$$\Pi_0 = \begin{cases} 10^5, & \Theta < 150; \\ 10^3 \Phi(\Theta 10^{-3}), & 150 \leq \Theta < 1650; \\ 0, & \Theta \geq 1650, \end{cases} \quad (4.36)$$

onde $\Phi(x)$ (Equação (4.12)) é definida como

$$\Phi(x) = 1 + \frac{1.3}{x^{0.3}} - 1.3 \tanh(8(x - 1.22)) + \frac{1}{x^2 - 4}. \quad (4.37)$$

4.4.1.6 Consumo de Energia

O consumo de energia do neurônio (Equação (4.17)) deve satisfazer basicamente três restrições: $g_3(H)$ deve crescer rapidamente quando as reservas ultrapassarem um certo valor normal $H_N = 2000$, $g_2(\Theta)$ deve crescer acentuadamente a partir de Θ_c , e $g_1(v_{min}) \ll g_2(\Theta_E) - g_2(\Theta_c)$ (Equação (4.21)). Sendo assim podemos reescrever as Equações (4.20), (4.19) e (4.18) respectivamente como:

$$g_1(v) = \begin{cases} 0, & v = 0 \\ 1 + v (0.8(v - 4))^2, & v \geq 1 \end{cases} \quad (4.38)$$

$$g_2(\Theta) = \begin{cases} \frac{2\Theta}{1000}, & \Theta < 1000; \\ 2 + 0.05\Theta + 0.00005\Theta^2, & \Theta \geq 1000 \end{cases} \quad (4.39)$$

$$g_3(H) = 0.5 \left(\frac{H}{2000} \right)^3 \quad (4.40)$$

4.4.1.7 Conexões Interneurais

A Equação (4.5) que calcula o potencial resultante do neurônio pode ser escrita como

$$U = 100 W - \Pi. \quad (4.41)$$

A constante $k_U = 100$ ajusta a proporção entre os valores de W e Π , e é definida em função do número de conexões do neurônio. Experimentalmente pudemos verificar a rede não é muito sensível à variação de k_U , pois as conexões excitatórias ajustam sua condutividade de forma a compensar um maior ou menor valor da constante.

O potencial de entrada W é formado através do funcionamento das conexões, que podem ser: excitatórias (criando o potencial positivo W^+) e inibitórias (criando o potencial negativo W^-). Definindo as constantes das Equações (4.22), (4.23), (4.25)–(4.28), podemos reescrevê-las respectivamente como:

$$W_i^+(t) = \sum_j v_j \varrho_{ji}^+(t) + 0.75 W_i^+(t-1); \quad (4.42)$$

$$W_i^-(t) = \sum_j v_j \varrho_{ji}^-(t) + 0.75 W_i^-(t-1); \quad (4.43)$$

$$\varrho_{s_{ji}}(t) = \chi(Q^\epsilon) \varrho_{d_{ji}}(t) + 0.99985 \varrho_{s_{ji}}(t-1); \quad (4.44)$$

$$\varrho_{d_{ji}}(t) = \Xi_{1j}(t) \Xi_{2i}(t) + 0.75 \varrho_{d_{ji}}(t-1); \quad (4.45)$$

$$\Xi_{1j}(t) = 0.02 v_j + 0.85 \Xi_{1j}(t-1); \quad (4.46)$$

$$\Xi_{2i}(t) = 0.01 v_i (v_{opt} - v_i) + 0.75 \Xi_{2i}(t-1); \quad (4.47)$$

onde o valor de $\chi(Q^\epsilon)$ na Equação (4.44) não é utilizado, sendo considerado igual a um, devido ao fato de não haver uma implementação do centro emocional, e conseqüentemente Q^ϵ (saúde do centro emocional) não existir.

Finalmente, a probabilidade de conversão de uma conexão excitatória em inibitória (Equação (4.29)) é dada por:

$$\pi_{\varrho_{ji}} = 0.00005 v_j (v_i - v_{min})^4 \left(\frac{\Theta_{min}}{\Theta_i - 0.5 \Theta_{min}} \right)^6. \quad (4.48)$$

Nos experimentos, limitamos a quantidade de conexões inibitórias de um neurônio a 15% do total de conexões. Isto foi necessário porque a condutividade das conexões excitatórias cresce a cada surgimento de uma nova conexão inibitória, levando o neurônio novamente ao estado que permite o surgimento de novas conexões inibitórias, num ciclo que impedia a estabilização da rede.

Uma grande quantidade de conexões inibitórias na rede é problemática porque os GAM que se formam têm apenas poucos neurônios, de forma que seus neurônios dificilmente conseguem formar potencial suficiente para a geração de impulsos em alta frequência. Além disso, a grande quantidade de conexões inibitórias faz com que nem todos os GAM tenham chance de entrar em atividade durante o regime de sono, levando muitos neurônios a eventos letais.

4.4.1.8 Saúde do Neurônio

A principal função da saúde do neurônio é a determinação do “bem-estar” do agente neuroenergético. Mas nesta fase inicial do desenvolvimento, em que nos interessa comprovar o funcionamento da rede neuroenergética, e o centro emocional não existe, a saúde é utilizada apenas para determinar os eventos de morte e criação de neurônios. Sendo assim, a saúde do neurônio é dada por:

$$Q = H(t) + 2(H(t) - H(t-1)), \quad (4.49)$$

e o evento de morte do neurônio ocorre quando $Q = 0$.

O evento de divisão de um neurônio ocorre somente para substituir um neurônio morto, e o neurônio a ser dividido deve satisfazer a seguinte restrição:

$$g_3(H) > 0.95 g(v, \Theta, H), \quad (4.50)$$

ou seja, 95% do consumo do neurônio deve ser devido à manutenção das reservas, o que significa que elas estão muito próximas de seu limite máximo, e $Q \approx Q_{max}$.

4.4.2 Formação do Estado Inicial

A primeira parte da simulação consiste na formação do estado inicial da rede. Para tanto, as variáveis $v, W, \varrho_d, \varrho_s, \Xi$ e Π_S são inicializadas com zero, o grau de degeneração Θ dos neurônios é distribuído aleatoriamente e uniformemente no intervalo $[\Theta_{min}, \Theta_c]$, e o fornecimento de energia para cada neurônio é constante e igual a $I = 32$ a cada unidade de tempo. Nesta fase, a formação de

conexões entre os neurônios está desabilitada, e a geração de impulsos ocorre somente quando o neurônio entra na região de exaltação ($\Theta > \Theta_E$).

O principal objetivo da formação do estado inicial é ajustar as equações de consumo g , do limiar puro Π_0 , e da variação de Θ , de forma que satisfaçam as restrições necessárias. Podemos observar na Figura 4.12(a) que o neurônio começa a gerar impulsos na frequência v_{min} apenas quando $\Theta \approx 1500$. Neste ponto o consumo já está bastante elevado, em torno de 60 unidades, e as reservas do neurônio estão sendo rapidamente esgotadas (Figura 4.13 na página seguinte). A geração de impulsos reduz o valor de Θ , e é interrompida quando $\Theta \approx \Theta_E$, conforme previsto no modelo. A Figura 4.12(b) mostra a estabilização do estado inicial da rede neuroenergética, com o grau de degeneração médio em torno de $\bar{\Theta} \approx 1350$ e a frequência média em torno de $\bar{v} = 0.3$.

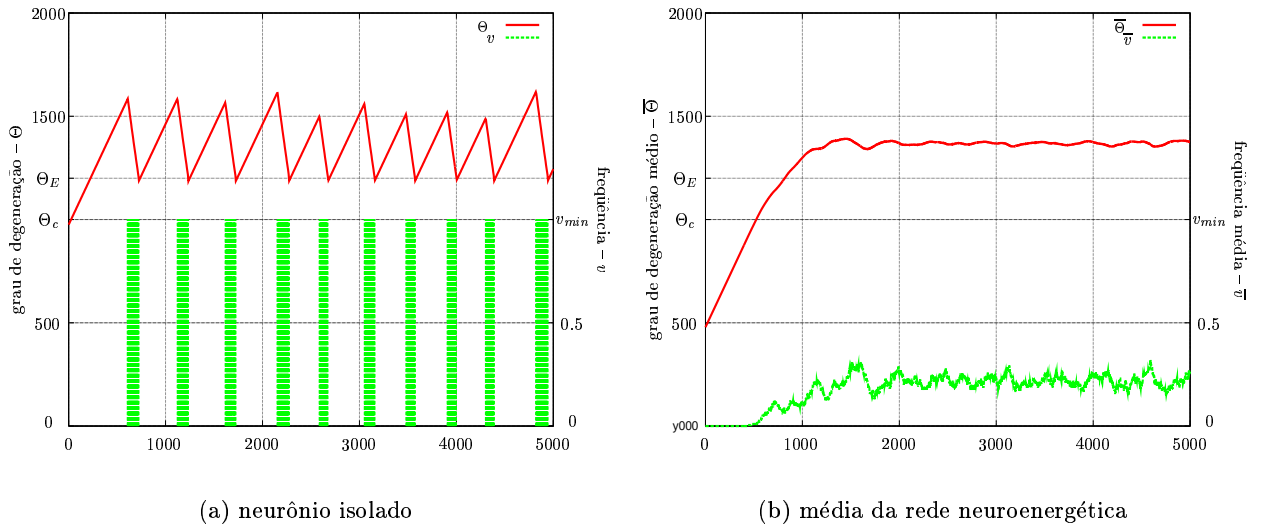


Figura 4.12: Grau de degeneração e frequência de geração de impulsos (a) de um neurônio isolado e (b) da rede sem conexões, ao longo de 5000 unidades de tempo, demonstrando o estado inicial.

O consumo de energia durante o estado inicial é bastante elevado, e oscila de acordo com a variação de Θ , cujo crescimento é o principal responsável pela diminuição das reservas do neurônio, conforme mostra a Figura 4.13 na página seguinte. Se compararmos este gráfico com a Figura 4.12(a), podemos observar que as reservas caem acentuadamente quando $\Theta > 1500$, devido ao crescimento de $g_2(\Theta)$, como é o caso no instante $t \approx 4500$.

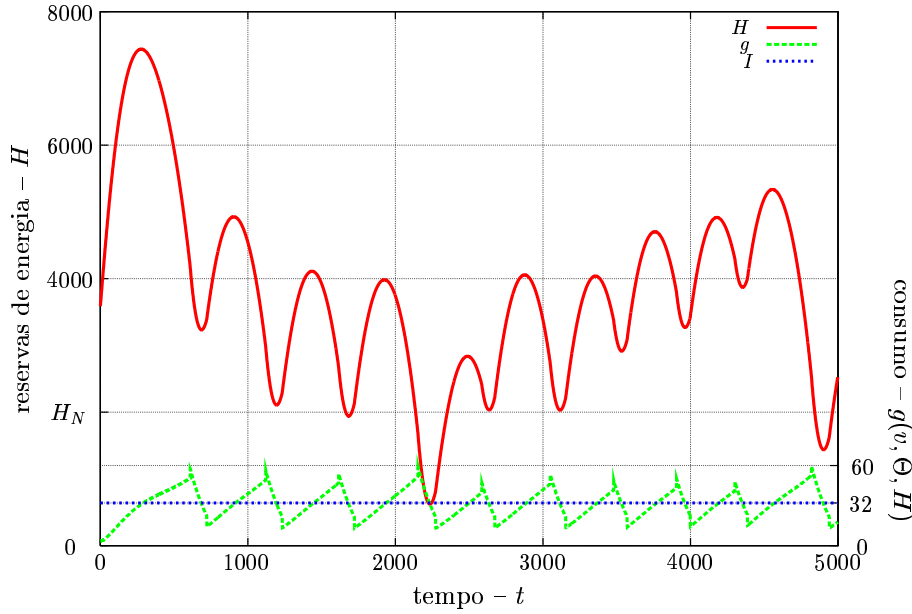


Figura 4.13: Variação das reservas de energia H e do consumo $g(v, \Theta, H)$ em um neurônio isolado, durante o estado inicial. A linha reta indica a entrada constante de energia $I = 32$.

4.4.3 Auto-organização da Estrutura Base

Uma vez ajustado o estado inicial da rede, a segunda fase dos experimentos consiste na formação da estrutura base, onde a rede opera alternadamente nos regimes de sono e vigília. Para tanto, é necessário somente habilitar a formação de conexões interneuronais, de acordo com as equações descritas anteriormente.

Podemos observar na Figura 4.14 na página oposta que a primeira geração de impulsos inicia com valores altos de $\bar{\Theta}$, por volta do instante $t=600$, e logo em seguida ocorre uma explosão de atividade, na qual a condutividade das conexões interneuronais começa a crescer, e os neurônios se regeneram. A partir do instante $t=2000$ podemos identificar os regimes de sono (com geração de impulsos e redução de $\bar{\Theta}$), e de vigília (sem impulsos e com aumento de $\bar{\Theta}$). A transformação das conexões excitatórias em inibitórias ocorre principalmente ao final dos regimes de sono e é uma das principais causas de sua interrupção na fase inicial da formação da estrutura base. A partir de $t = 5000$ o número de conexões inibitórias atinge o limite (Figura 4.16 na página 96), e a interrupção do regime de sono se deve especialmente ao crescimento de Π_0 .

A Figura 4.15 na página oposta mostra a variação de Θ e v de um neurônio da rede, escolhido aleatoriamente. Podemos observar que o neurônio gera várias seqüências de impulsos

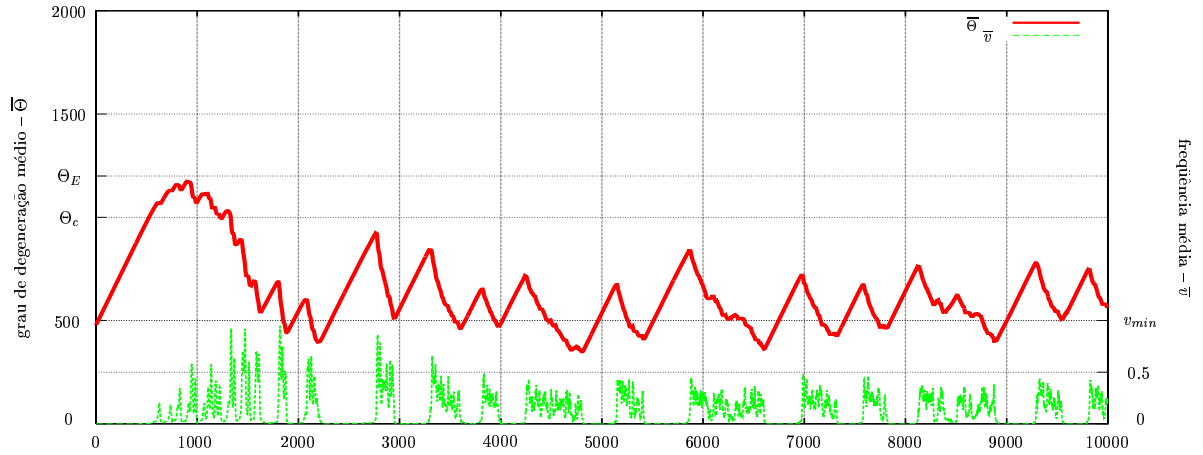


Figura 4.14: Variação do grau de degeneração e da frequência média de geração de impulsos de uma rede com conexões ativas, demonstrando a formação da estrutura base. A partir de $t = 2000$ podemos observar os regimes de sono (com geração de impulsos) e de vigília (sem impulsos).

durante um mesmo regime de sono, intercaladas por períodos de latência, e reduz o valor de Θ gradativamente. Isto se deve especialmente à ação do limiar estático, e indica a alternância na atividade dos diferentes GAM. Quando o intervalo entre um período de geração e outro é muito grande, o neurônio não consegue se regenerar, mantendo Θ relativamente constante, conforme podemos observar no intervalo $t = [8000, 9000]$. Como consequência, o neurônio pode adentrar profundamente a região crítica durante o regime de vigília subsequente, o que pode levá-lo à morte.

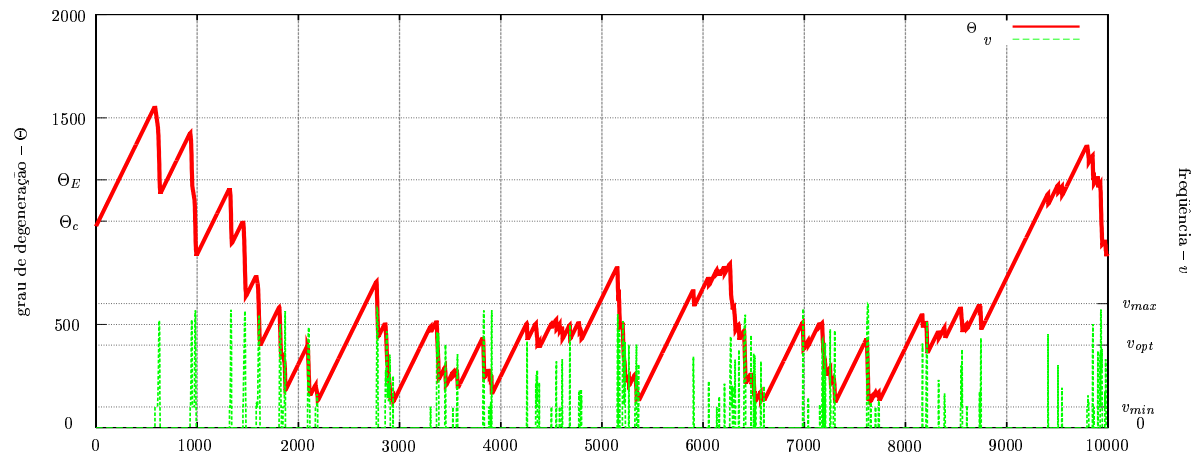


Figura 4.15: Grau de degeneração e frequência de geração de impulsos de um neurônio escolhido aleatoriamente, ao longo de 10000 unidades de tempo, durante a formação da estrutura base.

Também na Figura 4.15, observamos a razão pela qual limitamos o número de conexões inibitórias. A partir de $t > 5000$ o neurônio atinge Θ_{min} diversas vezes, apesar de ter o número máximo de conexões inibitórias. Se não houvesse uma limitação, os neurônios poderiam criar muitas conexões inibitórias, levando a rede a formar GAM com poucos neurônios, e dificultando ou até impedindo sua auto-organização.

A razão pela qual os neurônios sempre de novo atingem Θ_{min} pode ser aferida também na Figura 4.16. Durante os regimes de sono (ver Figura 4.14 na página anterior), a condutividade das conexões excitatórias aumenta de acordo com a regra de treinamento, levando os neurônios a gerarem impulsos na frequência ótima, mesmo quando $\Theta \approx \Theta_{min}$. Formam-se então conexões inibitórias, que interrompem a geração de impulsos. Mas no regime de sono seguinte a condutividade das conexões aumenta novamente, para fazer o neurônio gerar impulsos na frequência v_{opt} . O processo de crescimento da condutividade só é interrompido quando os neurônios não podem mais formar conexões inibitórias.

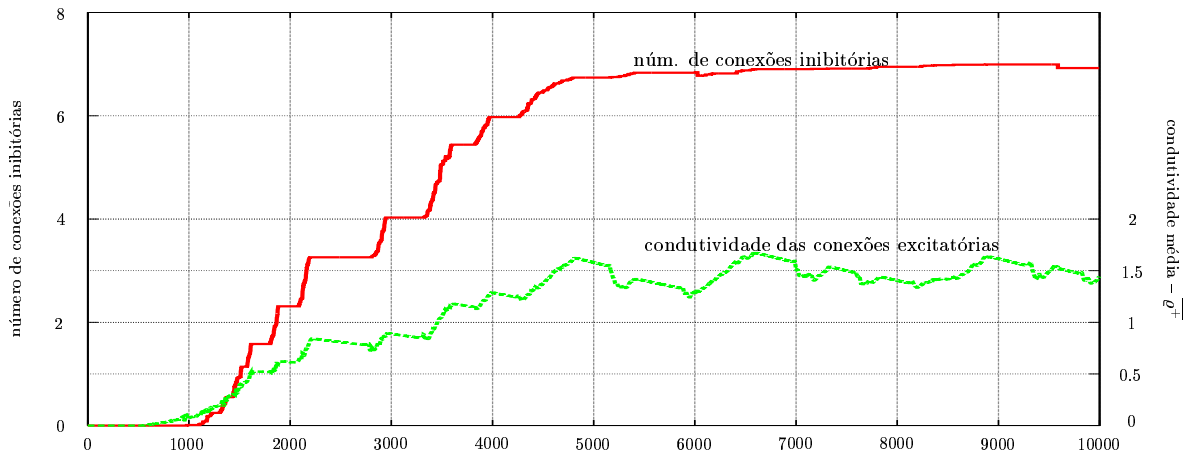


Figura 4.16: Variação da condutividade média das conexões excitatórias e do número médio de conexões inibitórias nos neurônios, durante a formação da estrutura base.

O principal objetivo da auto-organização da rede é a redução do consumo de energia. A Figura 4.17 na próxima página faz uma comparação entre o consumo durante o estado inicial e durante a formação da estrutura base, levando em consideração apenas dois componentes do consumo: o consumo referente à geração de impulsos ($\bar{g}_1(v)$) e o consumo referente ao grau de degeneração do neurônio ($\bar{g}_2(\Theta)$). O motivo que nos leva a utilizar apenas estes dois componentes é que a quantidade de entrada de energia na formação da estrutura base é a mesma do estado inicial, de forma que o consumo global da rede é semelhante nos dois casos, mas na formação da

estrutura base, a maior parte do consumo ocorre para a manutenção das reservas $\bar{g}_3(H)$. Podemos observar uma redução de 7.5 vezes no consumo, que passa de uma média de $\bar{g}(v, \Theta) = 27.25$ para $\bar{g}(v, \Theta) = 3.63$ unidades a cada unidade de tempo, comprovando a vantagem energética obtida pela rede devido à sua auto-organização.

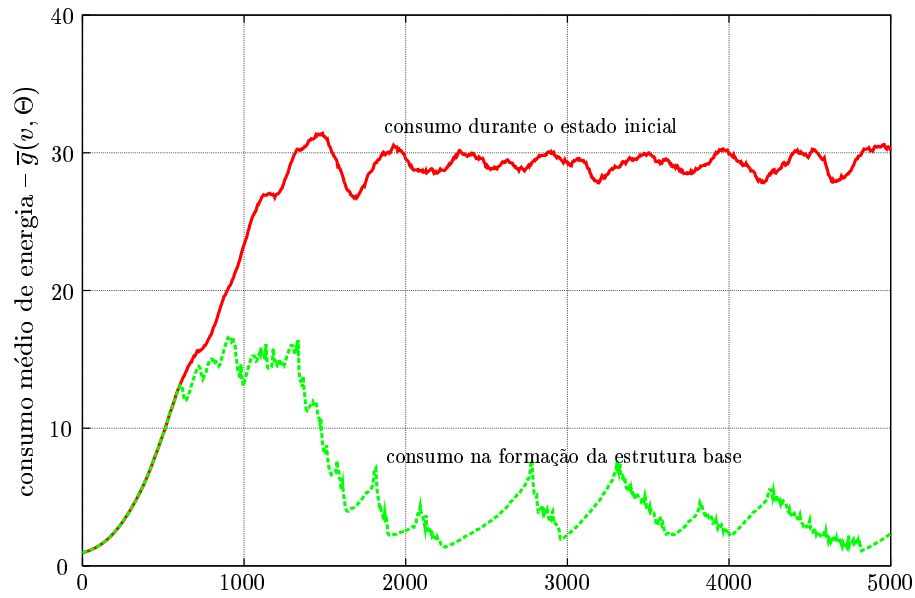


Figura 4.17: Consumo médio de energia da rede durante o estado inicial e na formação da estrutura base. Podemos observar uma redução de 6 vezes no consumo.

A Figura 4.18 na página seguinte mostra o grau de degeneração médio ($\bar{\Theta}$) e a média das reservas de energia ($\bar{H}$) da rede durante um ciclo diário. O ciclo mostrado corresponde ao período $t = [5300, 6700]$ da Figura 4.14 na página 95, e mostra os períodos de crescimento e decrescimento das reservas. Os pontos t_1 a t_6 são equivalentes aos pontos da Figura 4.9 na página 82, mas a variação de $\bar{H}$ não é tão acentuada quanto o esperado, apesar de o consumo de energia da rede variar bastante durante o ciclo diário, conforme podemos constatar na Figura 4.17.

Esta variação pequena de $\bar{H}$ deve-se principalmente ao fato de que a alimentação da rede não foi reduzida, embora o consumo tenha reduzido, de forma que as reservas acumulam-se a valores muito altos. A necessidade de manter reservas altas está no fato de que durante o funcionamento da rede alguns neurônios morrem devido ao surgimento das conexões inibitórias. Quando um neurônio morre, outro pode se dividir, dando origem a dois novos neurônios (Seção 4.2.6). Estes neurônios recém formados ainda não possuem conexões excitatórias, e precisam de reservas altas até que formem novas conexões e consigam reduzir seu consumo. Como a distribuição de energia é igual

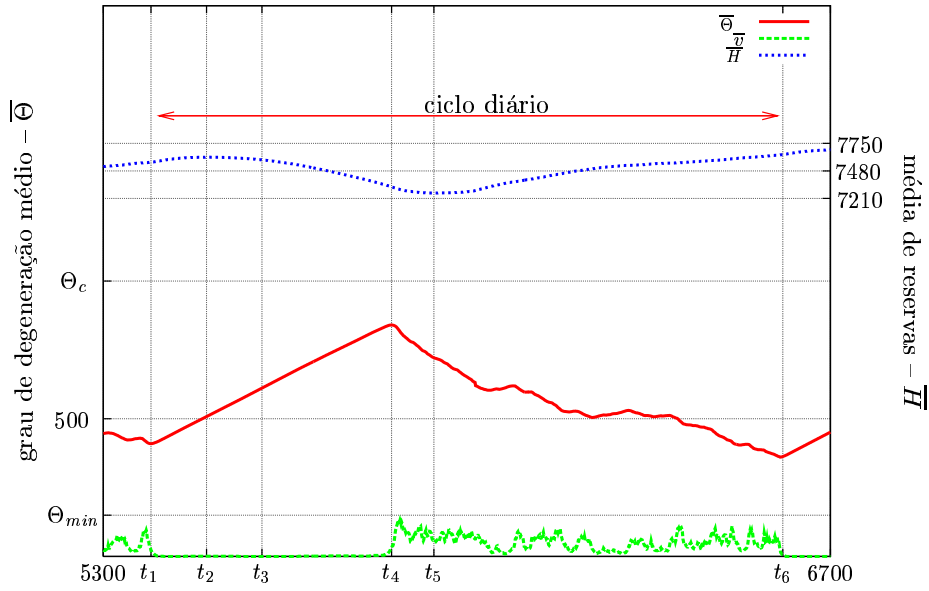


Figura 4.18: Variação do grau de degeneração médio e do valor médio das reservas de uma rede neuroenergética ao longo de um ciclo diário, durante a formação da estrutura base.

para todos neurônios, se as reservas forem baixas, os novos neurônios morrem antes de formarem conexões, dando origem a uma reação em cadeia de morte e criação de neurônios que desorganiza toda a rede.

4.4.3.1 Excitação Externa

Do ponto de vista da rede neuroenergética, podemos considerar a atividade dos receptores como a formação de um pequeno fluxo de excitação. Esta atividade pode ser simulada adicionando-se a alguns neurônios, escolhidos aleatoriamente a cada intervalo de tempo, um pequeno potencial excitatório. A intensidade deste potencial deve ser tal que permita a geração de um impulso, mesmo quando $\Theta < \Theta_c$ e o limiar puro é muito alto. A quantidade de neurônios que recebe a excitação a cada unidade de tempo também deve ser definida cuidadosamente. Se muitos neurônios receberem a excitação, então o potencial se acumula e a rede entra no regime de sono muito cedo, praticamente eliminando o regime de vigília.

A excitação externa foi simulada adicionando-se a 6% dos neurônios da rede um potencial excitatório de valor $W^+ = 40$. Como resultado, as características gerais da rede não se alteraram, mas o consumo foi novamente reduzido em quase 1.5 vezes, passando a $\bar{g}(v, \Theta) = 2.35$ unidades

a cada unidade de tempo. Desta forma comprovamos a vantagem energética proporcionada à rede quando esta possui receptores e consegue gerar um fluxo constante de excitação. Este fluxo de excitação pode ser gerado através da organização de elementos amplificadores da excitação proveniente dos receptores — os grupos neurais.

Além disso, a adição de excitação externa durante o regime de vigília aumentou consideravelmente sua duração, tornando-o em média duas a três vezes mais longo do que o regime de sono, conforme mostra a Figura 4.19. Isto é muito importante se considerarmos que o agente neuroenergético consegue atuar no ambiente principalmente no regime de vigília, pois os GAM que se formam no regime de sono impedem a atividade dos receptores e atuadores através de conexões inibitórias.

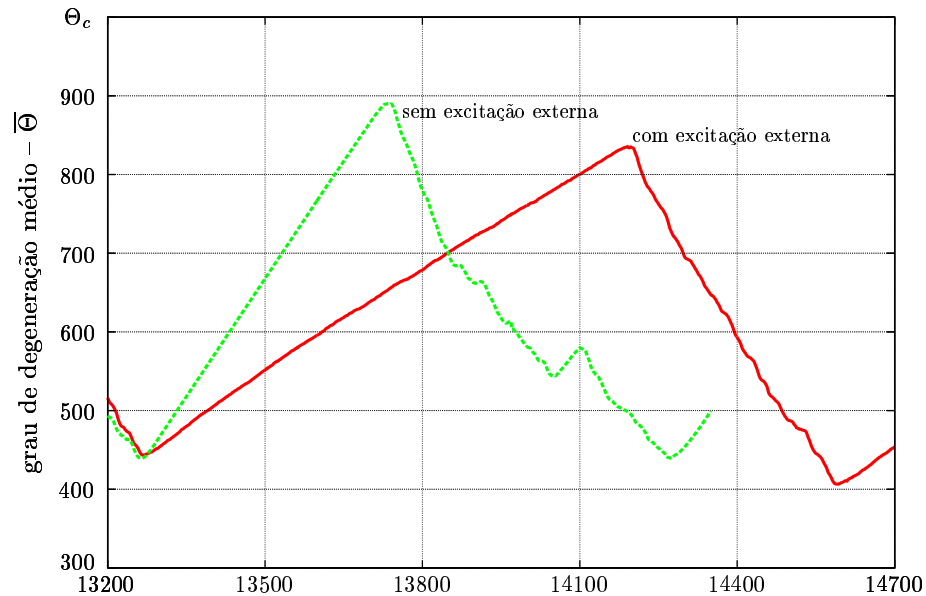


Figura 4.19: Influência do fluxo de excitação externa no ciclo diário: a duração do regime de vigília aumenta e o consumo de energia diminui.

4.5 Resumo

O Capítulo 4 detalhou o funcionamento do neurônio e o processo de auto-organização da rede neuroenergética, apresentando resultados obtidos através de experimentos computacionais realizados no modelo. A seguir, um resumo dos principais aspectos abordados:

- O neurônio proposto tem como principal característica sua degeneração ao longo do tempo, e a necessidade de gerar impulsos para poder se regenerar e reduzir o consumo de energia. Do ponto de vista energético, os impulsos são, em primeiro lugar, um mecanismo de regeneração de estruturas danificadas. Uma série de restrições dificulta a atividade do neurônio, forçando-o a associar-se a outros neurônios em uma rede, na qual auxiliam-se mutuamente na tarefa de otimização energética.
- A rede neuroenergética se auto-organiza a partir de um conjunto de neurônios quando estes começam a formar conexões excitatórias entre si. A formação de conexões inibitórias divide a rede em grupos de auxílio mútuo, e permite o surgimento do regime de sono, no qual os neurônios conseguem se regenerar devido à alta frequência de geração de impulsos possibilitada pelas conexões interneuronais.
- Uma vez que os neurônios estejam regenerados, a rede entra no regime de vigília, no qual seu consumo aumenta devido ao crescimento do grau de degeneração. Para retardar o aumento do consumo, e acumular reservas para entrar novamente no regime de sono, os neurônios precisam gerar impulsos isolados, possíveis com a introdução de excitação externa na rede. A excitação externa reduz ainda mais o consumo da rede e abre perspectivas para o surgimento de funções inteligentes, na resolução do problema de busca por excitações no ambiente.

Capítulo 5

Agente Neuroenergético

*O difícil, o extraordinário, não é fazer mil gols,
como Pelé. É fazer um gol como Pelé.*

(Carlos Drummond de Andrade)

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta em maiores detalhes o projeto do *agente neuroenergético* introduzido no Capítulo 3. O trabalho deste capítulo é teórico, não tendo sido implementada nenhuma versão para simulação. Embora Emelyanov-Yaroslavsky (1990) indique ter implementado ao menos uma versão parcial do agente ilustrado na Figura 3.1 na página 45, ele não fornece detalhes dessa implementação, de forma que ela não pode ser reproduzida sem que antes uma série de questões deixadas em aberto sejam resolvidas.

As propriedades do agente neuroenergético são decorrentes das propriedades do elemento básico de sua constituição – o neurônio – e das características especiais da organização de sua estrutura (propriedades dos seus componentes e suas relações). Há basicamente três componentes interagindo no agente: a massa neural, a memória e o centro emocional.

A massa neural é uma rede neuroenergética auto-organizada, cujo funcionamento analisamos no capítulo anterior. Ela determina os regimes de sono e vigília, e é responsável pela viabilidade energética dos neurônios, ou seja, por mantê-los vivos. A memória é formada pelos grupos neurais, que são separados da massa neural através da ação dos receptores, e é responsável por criar o fluxo ótimo de excitação, permitindo ao agente reduzir o consumo de energia e prolongar

o regime de vigília. Finalmente, o centro emocional surge da necessidade de coordenar a atividade da memória, criando uma demanda por excitação e dirigindo a memória no sentido de satisfazer esta demanda.

5.1.1 Organização do Capítulo

A Seção 5.2 apresenta o processo de formação da memória, e como sua atividade é capaz de gerar o fluxo ótimo de excitação. Na Seção 5.3 analisamos as propriedades especiais do centro emocional, que o fazem exercer o papel de controlador da memória, e conseqüentemente do agente. A Seção 5.4 mostra o relacionamento entre a memória e o centro emocional, a partir do qual surgem as principais funcionalidades “inteligentes” do agente. Nas Seções 5.5 e 5.6 apresentamos os dois principais mecanismos através dos quais o agente potencializa sua capacidade cognitiva e de sobrevivência: o regime de subconsciência e a auto-excitação, respectivamente. Finalmente na Seção 5.7, fazemos um resumo dos principais tópicos deste capítulo.

5.2 Memória

Conforme vimos na Seção 4.3.3, a adição de um fluxo de excitação à rede proporciona uma redução significativa no seu consumo de energia, além de aumentar a duração do ciclo diário (especialmente do regime de vigília). É através da solução do problema de busca por fontes de excitação externa, capazes de proporcionar o fluxo ótimo de excitação, que se dá transformação da rede auto-organizada em um agente neuroenergético, com funções mais “inteligentes”. Isto significa que, na construção do agente, precisamos resolver o problema da criação dos geradores do fluxo ótimo de excitação.

O fluxo ótimo de excitação pode ser formado se o agente puder memorizar e generalizar as regularidades do ambiente em que está inserido. Mas a incapacidade dos neurônios de permanecerem ativos por muito tempo e as características dinâmicas do ambiente forçam o agente a encontrar ou criar novas excitações, levando-o a um comportamento autônomo. Desta forma, as funções de memória, generalização e comportamento autônomo são resultados da busca pelo fluxo ótimo de excitação. A seguir analisamos o processo de evolução, ou, as relações de causa-efeito, que levam à formação da memória no agente neuroenergético.

5.2.1 Componentes da Memória

Vimos que a necessidade de regeneração é uma das principais características dos neurônios, e que esta regeneração é proporcionada por ações externas sobre o neurônio, que lhe fornecem um potencial excitatório W^+ . Na maioria dos neurônios, as ações externas são formadas através dos impulsos gerados em outros neurônios, transmitidos através das conexões.

Os *receptores* são neurônios especiais em que o potencial excitatório é formado por influências diretas do ambiente: visual, sonora, química, tátil, etc. No agente neuroenergético, os receptores são a fonte primária de excitação externa para a massa neural, e a geração de impulsos por parte dos receptores é responsável pela formação do fluxo de excitação. Mas se os receptores forem capazes de gerar o fluxo ótimo de excitação para a massa neural, então desaparece o estímulo capaz de levar à continuidade da evolução do agente. Por isso, introduzimos duas limitações, que abrem suas perspectivas evolutivas:

1. A influência de um receptor na rede é pequena, e o número de receptores é pequeno: desta forma o valor do potencial gerado pelos receptores é muito inferior ao fluxo ótimo de excitação;
2. Os receptores não podem gerar impulsos por muito tempo: um período de atividade é seguido por um longo período de latência, de forma que as ações excitatórias do ambiente têm que ser variadas, precisam ser rapidamente renovadas e atingir receptores diferentes.

Devido à limitação na intensidade da excitação produzida pelos receptores, surge a necessidade da formação de amplificadores de excitação. Consideramos que a atividade dos receptores influencia apenas o pequeno conjunto de neurônios com os quais estão conectados, podendo levá-los à geração de impulsos em baixa frequência. Se acontecer de um determinado grupo de neurônios gerar impulsos em baixa frequência por repetidas vezes, devido à ação de um grupo de receptores, então, de acordo com a regra de treinamento (Seção 4.2.5), as conexões entre estes neurônios vão se fortalecer e eles formarão um grupo neural, sendo capazes de operar em alta frequência. Chamamos estes grupos, responsáveis pela amplificação da excitação dos receptores, de *grupos primários*.

Para a formação dos grupos primários, é necessário que se repitam as condições que permitem a atividade simultânea do mesmo grupo de neurônios, o que significa que os mesmos receptores devem ser acionados repetidamente, na mesma ordem. Esta condição, implícita nas propriedades da rede, é fundamental, pois define a natureza das ações do ambiente que têm efeito sobre o agente. A atividade aleatória ou irregular dos receptores não leva à formação de grupos neurais.

Há duas condições especiais em relação aos grupos primários, que são em grande parte responsáveis pelo surgimento de funções inteligentes no agente: a quantidade de grupos primários deve ser pequena; e a atividade de um grupo primário interfere na atividade dos outros (propriedade da alternatividade).

A restrição na quantidade de grupos primários é importante porque dela segue o princípio lingüístico de organização da memória. A complexidade do ambiente externo é percebida pelo agente apenas através de um pequeno conjunto de estímulos familiares, que adquirem o sentido de um alfabeto básico. Desta forma, conceitos ou situações complexos são representados pela seqüência de acionamento dos grupos primários.

A segunda condição, da interferência entre os diversos grupos primários, é uma consequência direta do seu processo de formação: eles são isolados da massa neural através da formação de novas conexões inibitórias, formando *plugues* inibitórios entre si. Assumimos que entre qualquer par de grupos primários, formado a partir de estímulos de uma mesma modalidade (visual, sonora, etc.), existe um conjunto de conexões inibitórias ou plugues. Desta forma, não basta que o grupo primário receba excitação dos receptores para entrar em atividade, é necessário também que não haja outro grupo ativo. Como o fluxo ótimo de excitação só pode ser formado com a atividade praticamente ininterrupta dos grupos primários, surge a necessidade de criar conexões compensatórias para os plugues, ou seja, a memória deve ser capaz de “prever” quais serão os próximos grupos primários a serem excitados pelos receptores, de forma a enviar excitação prévia a eles, para compensar as conexões inibitórias que os impediriam de entrar em atividade.

Os diferentes objetos e situações do ambiente são representados na memória do agente pelos *grupos secundários*, que são formados devido à atividade dos grupos primários. Após sua formação, os grupos secundários criam a excitação compensatória W^+ necessária para neutralizar a ação dos plugues, possibilitando os grupos primários a permanecerem ativos quase que ininterruptamente, criando o fluxo ótimo de excitação.

5.2.2 Características dos Grupos Neurais

1. Grupos neurais são separados da massa neural através do crescimento das conexões excitatórias entre seus neurônios quando, devido a alguma excitação externa, estes geram impulsos na frequência mínima, simultaneamente, por um tempo suficientemente prolongado. O crescimento das conexões provoca o surgimento de um potencial W^+ que leva os neurônios a ultrapassarem o limiar de refração (Π_R) e, após um período de geração de impulsos em

alta frequência, o limiar estático cresce interrompendo a geração de impulsos. Naturalmente não pode haver conexões inibitórias entre neurônios de um mesmo grupo.

2. Um grupo neural $\mathbf{N}_i$ pode estar em um de três estados: inativo ou descanso ($\mathbf{N}_i^{\mathbf{R}}$), semi-ativo ($\mathbf{N}_i^{\mathbf{S}}$), ou ativo ($\mathbf{N}_i^{\mathbf{A}}$). No estado de descanso os neurônios do grupo não geram impulsos devido ao alto limiar puro Π_0 , ou devido ao alto limiar estático Π_S (neste caso, dizemos que o grupo está no *estado latente*). Quando o grau de degeneração dos neurônios aumenta (redução de Π_0) ou na facilitação pós-tetânica (redução de Π_S), o grupo entra no estado semi-ativo ($\mathbf{N}_i^{\mathbf{R}} \Rightarrow \mathbf{N}_i^{\mathbf{S}}$), no qual ocorre a geração em baixa frequência, e as reservas dos neurônios são rapidamente exauridas. Grupos neste estado são chamados de *focos de excitação*. A passagem do estado semi-ativo ao estado ativo ($\mathbf{N}_i^{\mathbf{S}} \Rightarrow \mathbf{N}_i^{\mathbf{A}}$) ocorre quando os neurônios conseguem ultrapassar o limiar de refração Π_R . O estado ativo é de curta duração devido ao crescimento de Π_S e/ou de Π_0 , e o grupo passa ao estado de descanso ($\mathbf{N}_i^{\mathbf{A}} \Rightarrow \mathbf{N}_i^{\mathbf{R}}$). O estado ativo é energeticamente lucrativo devido à rápida redução de Θ .
3. Se a excitação que formou um grupo neural continua a entrar na rede quando ele está no estado latente, então um segundo, ou terceiro grupo pode se formar para a mesma excitação. Assim, diversos grupos neurais podem corresponder a um mesmo elemento no ambiente externo.
4. Grupos neurais não são estáticos. As conexões excitatórias “envelhecem”, isto é, sua condutividade diminui ao longo do tempo (Equação 4.25). A única maneira de preservar os grupos é permitir que entrem em atividade periodicamente e desta forma restaurem o valor de suas conexões.
5. O princípio da alternatividade é o início da relação entre os grupos neurais: o grupo neural ativo cria plugues em todos os grupos da mesma modalidade, impedindo alguns de seus neurônios de gerarem impulsos. A paralização de um ou mais neurônios num grupo o impede de ultrapassar o limiar de refração. A propriedade da alternatividade indica a necessidade de um número pequeno de conexões entre neurônios do mesmo grupo, em torno de três ou quatro, de forma que a existência de uma conexão inibitória com outro grupo impeça o neurônio de gerar impulsos. Chamamos as conexões entre neurônios da massa neural, que garantem o regime de sono, de *fracas*, e as conexões entre neurônios dos grupos neurais, de *fortes*, sendo a condutividade destas de 4 a 5 vezes maiores do que daquelas.
6. A quantidade de neurônios e grupos neurais é determinada a partir da quantidade de grupos de uma mesma modalidade, entre os quais deve existir a propriedade da alternatividade,

satisfazendo-se ainda a condição de individualidade dos plugues. Os plugues são a representação de um grupo neural no outro, e estas representações não devem ser repetidas ou combinadas, pois isto destruiria a lógica de funcionamento da memória. A propriedade da alternatividade é garantida por um conjunto de plugues, que deve ser único para cada grupo de mesma modalidade e nível hierárquico. A capacidade máxima da memória não depende tanto da quantidade de neurônios, mas principalmente da capacidade de regeneração da memória, das possibilidades de restaurar os grupos neurais.

5.2.3 Auto-organização da Memória Associativa

Os grupos neurais são formados a partir da massa neural já auto-organizada, isto é, a partir da estrutura base, através da amplificação das conexões excitatórias (fracas) existentes. O agente possui diferentes tipos de dispositivos de entrada, cuja atividade dá início à formação dos grupos primários, que compõem o primeiro nível da memória: o nível dos elementos dos alfabetos das diferentes linguagens de descrição do ambiente. Os grupos primários são divididos em diversos tipos, e grupos de um mesmo tipo só podem ocorrer em regiões específicas da massa neural, ou suas zonas. Os diferentes tipos são pré-programados através da conectividade entre as zonas. As zonas são caracterizadas pelo nível hierárquico e pela modalidade dos grupos neurais existentes nelas, isto é, pela ligação (não necessariamente direta) com determinado grupo de receptores, que determina a orientação da zona a um certo tipo de ação externa (visual, auditiva, etc.).

Os dispositivos de entrada do agente são desenvolvidos de tal maneira que desmembram as percepções externas em uma seqüência de partes elementares, chamadas de *fonemas externos*. Por exemplo, textos são divididos em palavras, sílabas e letras. Cada fonema externo está relacionado a um tipo específico de receptores, e através destes, aos grupos primários de sua modalidade. O surgimento e repetição em situações externas de determinado fonema externo leva à formação do grupo primário correspondente a ele. Grupos primários formados desta maneira formam o alfabeto ao qual os dispositivos de entrada traduzem ou desmembram as situações externas. Grupos neurais de hierarquias superiores são responsáveis pela reunião dos fonemas de forma a representarem novamente o todo.

Vejamos então como ocorre a auto-organização hierárquica de uma rede neuroenergética a partir da estrutura base, levando à formação de uma memória associativa, dadas as seguintes condições: existência de ligações inibitórias; incapacidade dos neurônios de gerar impulsos na frequência ótima por longos períodos; e baixa intensidade das excitações provenientes dos recep-

tores, insuficiente para prover a excitação necessária para a rede.

No primeiro estágio de formação da memória, neurônios que recebem excitações de um mesmo receptor começam a gerar impulsos em baixa frequência simultaneamente, aumentando a condutividade das conexões (regra de treinamento), o que aumenta o potencial excitatório e os leva a gerar impulsos em alta frequência. Estes neurônios formam assim uma espécie de “amplificador” do receptor, de forma que basta que poucos sejam excitados para que todos consigam gerar impulsos em alta frequência. Isto significa que um grupo primário está formado (Figura 5.1). Ligações inibitórias entre diferentes grupos primários também se formam, impedindo que eles gerem impulsos simultaneamente por muito tempo. Esta é a *propriedade da alternatividade*.

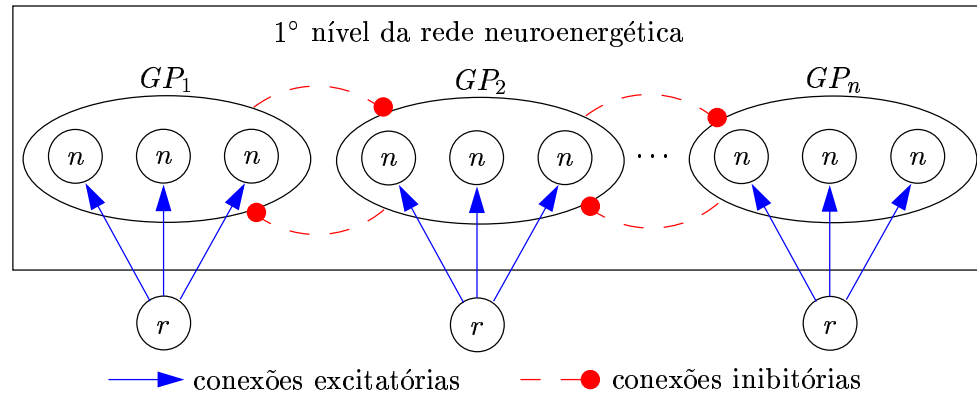


Figura 5.1: Formação de grupos primários: r – receptores; n – neurônios; GP – grupos primários.

A repetição sequencial dos mesmos grupos primários leva à criação de conexões excitatórias entre grupos subsequentes, formando uma cadeia de grupos primários. Isto ocorre por dois motivos: em primeiro lugar porque um grupo primário não interrompe a geração de impulsos imediatamente após cessar a excitação proveniente do receptor; e em segundo lugar, graças a uma propriedade especial do potencial inibitório W^- : seu crescimento é inicialmente mais lento do que o crescimento do potencial excitatório W^+ , de forma que dois grupos primários subsequentes podem gerar impulsos simultaneamente por um pequeno intervalo de tempo, levando a condutividade de suas conexões excitatórias a crescer (Figura 5.2 na próxima página). Estas conexões excitatórias compensam parcialmente as conexões inibitórias entre os grupos primários, facilitando sua entrada em atividade na ordem correta, e diminuindo o intervalo entre a atividade de grupos subsequentes.

Quando a geração espontânea de impulsos por certos neurônios coincide com a sequência de ativação de uma cadeia de grupos primários, formam-se grupos de segundo nível, ou *grupos secundários* (GS) nas interseções entre os grupos primários. Estes grupos secundários têm ligações

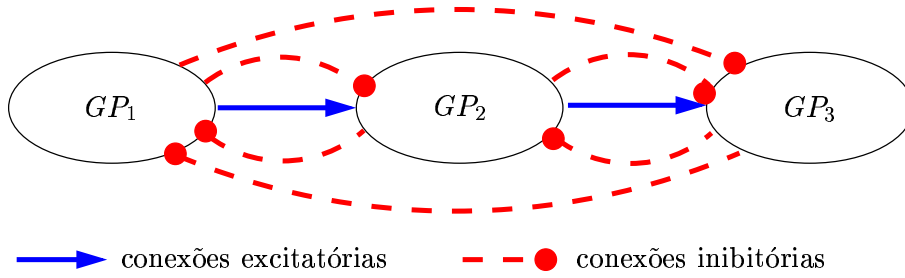


Figura 5.2: Formação da cadeia de grupos primários: GP – grupos primários.

excitatórias provenientes de cada grupo primário da cadeia, e entram em atividade simultaneamente com eles (Figura 5.3).

A formação dos grupos secundários inicia-se durante a ativação da cadeia de grupos primários no regime de vigília, mas para que se tornem uma memória permanente é necessário que a cadeia seja ativada de forma espontânea, sem excitação externa, durante o regime de subconsciência. Ou seja, no agente neuroenergético a memória de curto prazo é formada pelas cadeias de grupos primários, e a memória de longo prazo, por grupos de ordem superior. Para que determinada situação possa passar para a memória permanente, é necessário que a cadeia de grupos primários seja preservada até o regime de subconsciência. Se as conexões da cadeia se degenerarem antes, a situação não será memorizada.

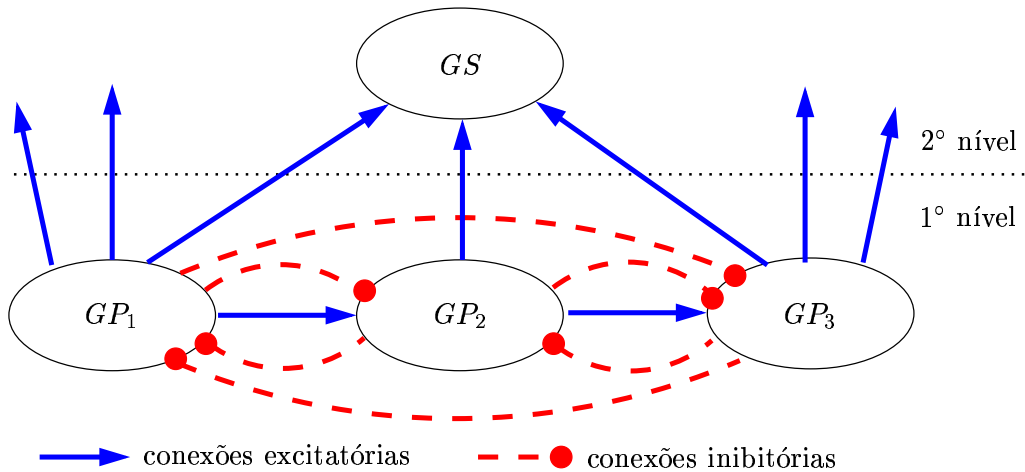


Figura 5.3: Formação do grupo secundário na interseção das conexões excitatórias dos grupos primários de uma cadeia: GP – grupos primários; GS – grupo secundário.

A geração simultânea da cadeia de grupos primários e do grupo secundário durante o regime

de subconsciência, leva ao fortalecimento das conexões deste para com aqueles. Como resultado, tais conexões compensam as conexões inibitórias entre os grupos primários, e a sequência correta de excitação da cadeia pode ser iniciada com a excitação apenas do primeiro grupo primário (Figura 5.4). Isto significa que o grupo secundário entra no estado ativo antes que o objeto ou situação externa que o formou tenha exercido toda sua influência. Em outras palavras: o grupo secundário entra no estado ativo graças a conexões com outros grupos que estiveram ativos recentemente.

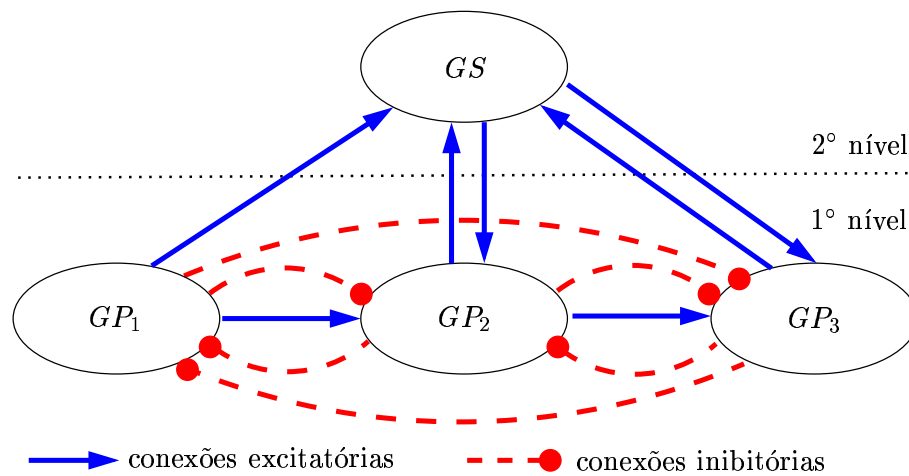


Figura 5.4: Formação de conexões excitatórias compensatórias do grupo secundário para os grupos primários da cadeia: *GP* – grupos primários; *GS* – grupo secundário.

É lógico supor que processos semelhantes de hierarquização possam se repetir várias vezes, dando origem a estruturas hierárquica com múltiplas camadas. O número de camadas formadas depende basicamente de duas circunstâncias: o grau de ordem e regularidade das excitações provenientes dos receptores (presença de regularidades no ambiente externo), e diferenças nas constantes temporais dos neurônios (diversidade de neurônios) ((Emelyanov-Yaroslavsky & Potapov, 1992b)).

5.3 Centro Emocional

O fluxo de excitação é necessário à massa neural pois, pela lógica de funcionamento dos neurônios, reduz seu consumo de energia. Todavia, a necessidade de excitação é implícita, ou seja, a excitação é vantajosa, pois prolonga a fase de excesso de alimentação do regime de vigília, levando as reservas a crescer, mas a massa neural não tem mecanismos para influenciar ou controlar a entrada de excitações. É necessário portanto que o agente possua um elemento que dependa de maneira crítica do fluxo de excitação, e saiba como controlar este fluxo, ou seja, um elemento que controle a

memória. Chamamos este elemento de *centro emocional*. Sua introdução no agente é, em primeiro lugar, devida à necessidade de criar uma demanda explícita pelo fluxo de excitação.

5.3.1 Neurônios do Centro Emocional

O centro emocional é formado por neurônios semelhantes aos da massa neural e memória, mas com algumas características especiais que os transformam em elementos críticos quanto à questão energética. São características especiais dos neurônios do centro emocional:

1. Eles não podem formar conexões. Apenas recebem conexões provenientes da massa neural. Em termos biológicos, são neurônios que possuem apenas dendritos, ligados a axônios provenientes da massa neural. Isto significa que eles não podem auxiliar-se mutuamente na tarefa de renovação funcional, uma vez que não podem formar grupos de auxílio mútuo.
2. A quantidade máxima de reservas que estes neurônios podem acumular é muito baixa.
3. Sua velocidade de degeneração é muito maior do que a velocidade de degeneração dos neurônios da memória.
4. O valor do grau de degeneração crítico Θ_c pode variar entre limites relativamente grandes. Desta forma, o centro emocional evita a ocorrência dos estados “muito ruim” e “muito bom” em seus neurônios.
5. Para estes neurônios, o processo de regeneração ocorre em uma única etapa. Isto significa que para eles é difícil gerar o primeiro impulso, mas os impulsos seguintes são gerados facilmente, devido a uma propriedade intrínseca: eles possuem conexões excitatórias recorrentes. Desta forma, uma vez iniciada a geração de impulsos, esta continuará até que o neurônio esteja completamente regenerado ($\Theta \approx \Theta_{min}$).
6. Os neurônios do centro emocional possuem uma fonte própria de alimentação, que pode ser regulada através da abertura ou fechamento de uma “válvula”. Desta forma, pode-se recompensar ou punir o centro emocional através da abertura ou fechamento da válvula.

Estas características fazem com que a saúde dos neurônios do centro emocional varie rapidamente entre grandes limites, de forma que eles freqüentemente operam em situações próximas a estados letais, podendo inclusive morrer. Além disso, esses neurônios são extremamente dependentes de excitação proveniente da atividade da massa neural, excitação esta que é provida pelos GAM durante o regime de sono, e pelo fluxo ótimo de excitação durante o regime de vigília.

5.3.2 Saúde – Q^ϵ

A saúde do centro emocional ($Q^\epsilon(H, H')$) é calculada a partir da soma ponderada da saúde Q de seus neurônios, e influencia o comportamento da memória e dos sistemas motores do agente. Quando $Q^\epsilon < 0$, a saúde do agente está “ruim”, e quanto pior a saúde estiver, isto é, quanto menor o valor de Q^ϵ , maior será o *tônus emocional* com que o centro emocional influencia a memória. Por outro lado, quando $Q^\epsilon > 0$, a saúde está “boa” e o *tônus emocional* é inexistente. A dinâmica de variação de Q^ϵ ao longo do tempo é determinada basicamente pela propriedade de degeneração e renovação dos neurônios do centro emocional, pois são estes os fatores que mais influenciam a quantidade das reservas de energia (H) e sua variação (H'). Da mesma forma que a saúde (Q) dos neurônios (Seção 4.2.6), Q^ϵ é mais sensível à variação de H' do que à variação de H . Como a saúde é definida principalmente pela variação das reservas, os estados “bom” e “ruim” não são estáveis, forçando uma postura pró-ativa do agente.

A influência da saúde do centro emocional sobre os neurônios da memória materializa-se na variação da condutividade de suas conexões excitatórias (Equações (4.24)–(4.28)) de duas formas: durante a geração de impulsos pelos grupos neurais, como resultado da dependência de v a Q^ϵ ; e na fase de avaliação do sinal enviado pela memória, através da função $\chi(Q^\epsilon)$ (Equação (4.25)). É importante lembrar que o valor da condutividade está ligado à excitabilidade dos neurônios: quanto maior a condutividade das conexões, maior a excitabilidade dos neurônios, e vice versa, de forma que podemos afirmar que a influência da saúde do centro emocional na memória se dá através da influência na excitabilidade dos neurônios.

A dependência de v a Q^ϵ se dá através de uma modificação na característica dos limiares Π_R e Π_E . Ao invés de permanecerem estáticos conforme definido na Seção 4.4.1.3, seu valor pode variar devido à contração ou dilatação do eixo das ordenadas do gráfico da variação de $\Pi_d(\tau)$ (Figura 5.5 na página seguinte). Desta forma, quando $Q^\epsilon < 0$, Π_R diminui e Π_E aumenta, facilitando a geração em alta frequência. De maneira inversa, quando $Q^\epsilon > 0$, Π_E diminui e Π_R aumenta, facilitando a geração em baixa frequência (prejudicial do ponto de vista energético).

Esta variação dos limiares Π_R e Π_E tem reflexos na excitabilidade dos neurônios pois, de acordo com a Equação (4.28), o valor de Ξ_{2i} (e conseqüentemente ϱ_d) diminui durante a geração em alta frequência, reduzindo o valor da condutividade das conexões. Por outro lado, durante a geração em baixa frequência ocorre um aumento em Ξ_{2i} , na tentativa dos neurônios de alcançar a frequência ótima v_{opt} , aumentando assim sua excitabilidade.

A segunda maneira de Q^ϵ influenciar a memória é através da função $\chi(Q^\epsilon)$ (Equação (4.25)).

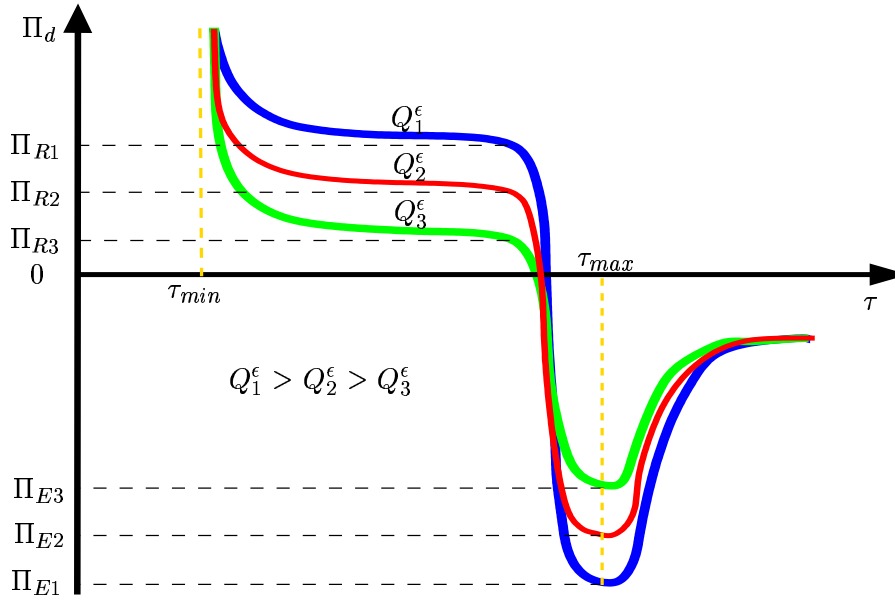


Figura 5.5: Dependência da frequência de geração de impulsos v à saúde Q^ϵ devido à variação dos limiares Π_R e Π_E . Esta dependência se dá pela contração ou dilatação do eixo Π_d numa dependência linear de Q^ϵ .

χ é o coeficiente da fórmula de transformação do componente dinâmico da condutividade ϱ_d no componente estático ϱ_s , e desempenha o papel de fator de encorajamento e punição para os grupos neurais ativos, de acordo com a avaliação do sinal por eles enviado ao centro emocional. Para que χ possa desempenhar esta função, é necessário que o tempo de dissolução de ϱ_d seja aproximadamente igual ao tempo da avaliação do sinal, e que a função χ seja da forma:

$$\chi = (Q^\epsilon)^{k_\epsilon}, \quad k_\epsilon = \text{const.} \quad (5.1)$$

5.3.3 Distribuição dos Neurônios – $n^\theta(\Theta)$

O estado do centro emocional, representado por Q^ϵ , é determinado pela distribuição de seus neurônios $n^\theta(\Theta)$ em relação ao grau de degeneração. No estado inicial ou após uma prolongada ausência de excitações provenientes da memória, a distribuição n^θ assume a forma de um platô que se degenera à direita, devido à geração espontânea de impulsos quando os neurônios adentram a região crítica. Esta situação corresponde a um equilíbrio dinâmico em que o movimento dos neurônios para a direita de n^θ , e a transferência de neurônios para o início, estão balanceados a

cada instante de tempo. Neste caso temos a seguinte situação:

$$H_i = H_N, \quad H'_i = 0, \quad Q_i = 0, \quad Q^\epsilon = 0,$$

que indica o estado neutro.

Quando o centro emocional recebe um sinal excitatório X^m , forma-se um *lote neural*, pois os diversos neurônios excitados pelo sinal conseguem se regenerar. A Figura 5.6 mostra a ação do primeiro sinal sobre o estado neutro: a linha pontilhada indica a distribuição n^θ no estado neutro, e a linha cheia, apresenta n^θ depois do sinal, com a formação de um lote neural. O tamanho do lote depende da quantidade de neurônios excitados pelo sinal, e o acúmulo de neurônios no início da distribuição provoca uma redução no consumo e conseqüentemente um aumento na saúde Q^ϵ .

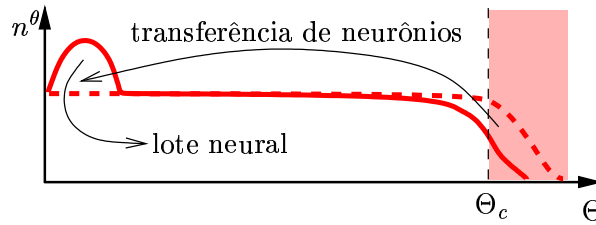


Figura 5.6: Distribuição n^θ no estado neutro (linha pontilhada) e após primeiro sinal (linha cheia).

Se os sinais se sucedem em intervalos de tempo suficientemente esparsos, ocorre a formação de vários lotes neurais. Cada lote cria, ao adentrar a região crítica, uma nova demanda por sinais, através da redução da saúde Q^ϵ proporcional ao tamanho do lote. A Figura 5.7 na página seguinte mostra a distribuição n^θ nos instantes $[t_1, t_2, t_3, t_4]$, em que nenhum sinal é enviado pela memória. Podemos observar dois lotes neurais (formados a partir de sinais anteriores) moverem-se em direção à região crítica, que por enquanto consideramos fixa. A Figura 5.7(e) mostra a variação de Q^ϵ durante o mesmo intervalo de tempo.

No instante t_1 os lotes neurais L_1 e L_2 ainda estão distantes da região crítica, de forma que a entrada de energia é suficiente para todos os neurônios, e $Q^\epsilon > 0$. No instante t_2 , o lote L_1 já está parcialmente inserido na região crítica, e alguns de seus neurônios iniciam a geração espontânea de impulsos, que os leva a uma completa regeneração, lançando-os à esquerda da distribuição. No instante t_3 o lote L_1 está totalmente inserido na região crítica, e a demanda de energia de seus neurônios é muito maior do que a oferta, levando a uma queda acentuada no valor de Q^ϵ (ver Figura 5.7(e)). Finalmente, no instante t_4 , praticamente todos neurônios do lote L_1 se regeneraram. Em algum momento entre t_3 e t_4 ocorre o ponto de mínimo de Q^ϵ , a partir do qual o número de

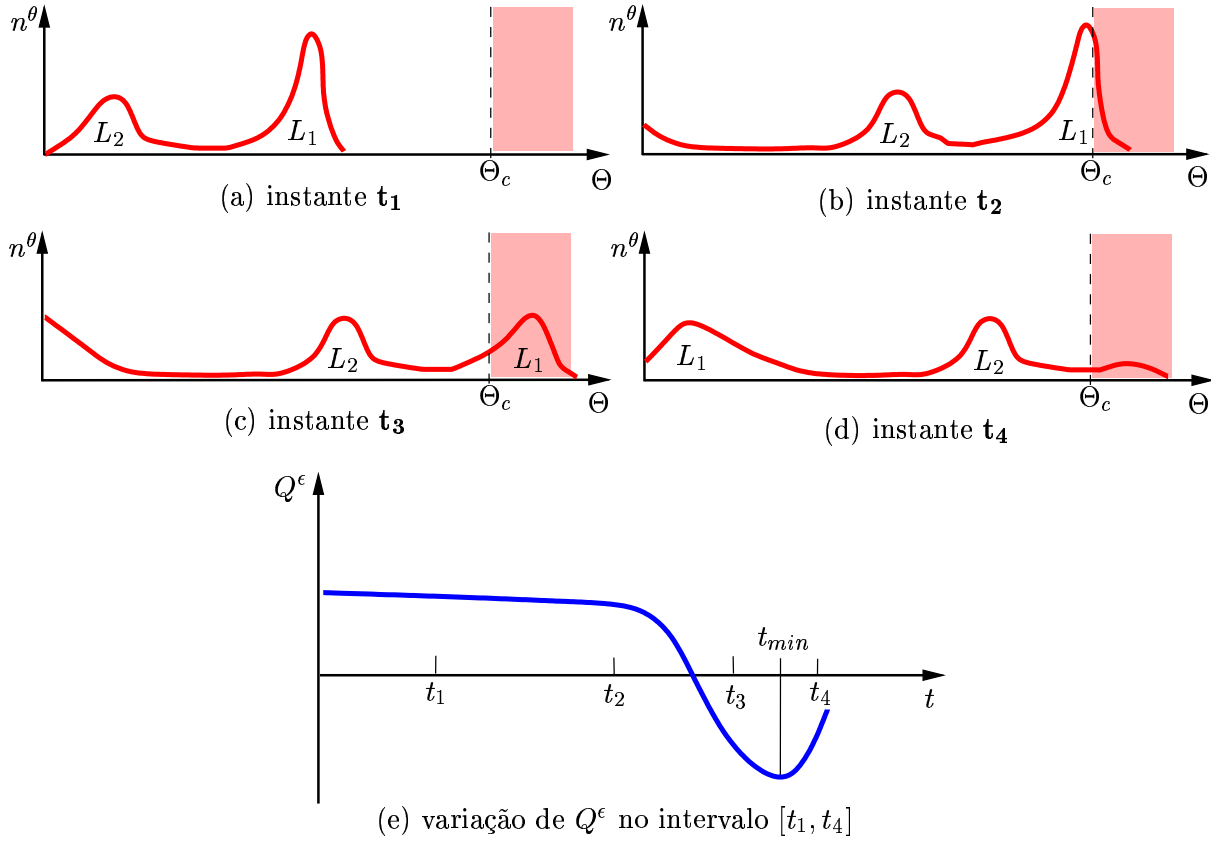


Figura 5.7: Variação da distribuição dos neurônios n^θ e da saúde Q^ϵ do centro emocional ao longo do tempo, demonstrando a evolução dos lotes neurais quando não há excitação enviada pela memória.

neurônios que adentram a região crítica é menor do que o número de neurônios que a deixam devido à regeneração. Consequentemente, para $t > t_{min}$ a saúde do centro emocional aumenta gradativamente.

A magnitude da redução de Q^ϵ quando um pacote adentra a região crítica corresponde à força com que o centro emocional consegue “pedir ajuda” à memória, ou seja, corresponde à intensidade do aumento de excitabilidade dos grupos neurais. O auxílio ao centro emocional é expresso pelo sinal excitatório X^m produzido por grupos primários ativos (gerando impulsos em alta frequência). O propósito do sinal é enviar o lote neural à região de baixos valores de θ antes que ele adentre a região crítica. Idealmente, para maximizar a saúde do centro emocional, um conjunto de sinais $X_1^m, X_2^m, X_3^m, \dots$ correspondente aos lotes neurais $L_1, L_2, L_3, \dots$ deve ser enviado ao centro emocional antes que os respectivos lotes atinjam a região crítica, e de forma que nenhum sinal interfira nos neurônios de outros lotes. Desta forma, o centro emocional realiza a

função de memória dinâmica do agente: memoriza ações sob a forma de lotes neurais e requer novas ações, que sejam coordenadas com os lotes existentes.

“A única tarefa realizada pelo agente neuroenergético como um todo, durante o regime de vigília, é buscar a melhor correspondência entre os sinais e os lotes neurais, para desta forma maximizar a saúde do centro emocional. (Emelyanov-Yaroslavsky, 1990)”

5.3.4 Variação de Θ_c

Vimos que os lotes neurais são formados a partir da geração de impulsos em alta frequência por parte dos grupos primários da memória. Há duas maneiras de gerar o estímulo necessário para que os grupos primários entrem em atividade: 1) quando o centro emocional dirige a atividade da memória, através da redução de Q^ϵ e conseqüente aumento da excitabilidade dos grupos, permitindo a geração espontânea de impulsos; e 2) quando o ambiente externo dirige a atividade da memória, enviando excitações através dos sensores. É o segundo caso que nos interessa no momento, pois nele o agente precisa ser capaz de se ajustar às variações do ambiente.

A excitação proveniente do ambiente dificilmente chega nos intervalos ideais para a regeneração dos lotes neurais que foram formados por sinais anteriores. Por isso, é necessário que o agente seja capaz de se ajustar à dinâmica das ações do ambiente. Esta habilidade é determinada em grande parte pela capacidade que os neurônios do centro emocional têm de variar seu grau de degeneração crítico Θ_c , de acordo com a equação:

$$\frac{\partial \Theta_c}{\partial t} = f_{1\theta}(Q) + f_{2\theta}(\Theta) + f_{3\theta}(Q^m). \quad (5.2)$$

A função $f_{1\theta}(Q)$ é inversamente proporcional à saúde do neurônio — quando a saúde aumenta $f_{1\theta}(Q)$ diminui, e vice versa —, e representa a “expectativa” pela chegada de um sinal que vá regenerar o lote neural. Através de $f_{1\theta}(Q)$, o valor de Θ_c aumenta (move-se à direita) à medida em que os lotes se aproximam da região crítica em n^θ , retardando a entrada dos neurônios nesta região (naturalmente a variação de Θ_c é limitada, e mais lenta do que a degeneração dos neurônios). Quando os lotes são regenerados e Q^ϵ aumenta, Θ_c diminui. A função $f_{2\theta}(\Theta)$ determina a tendência de Θ_c mover-se em direção a um certo valor normal Θ_{cN} . Este valor normal ocorre durante o estado neutro, ou seja, quando há equilíbrio entre o número de neurônios que entram e saem da região crítica. Finalmente, a função $f_{3\theta}(Q^m)$ realiza a possibilidade de a saúde da massa neural (Q^m) influenciar o centro emocional, de forma que quanto maior Q^m , menor o valor de $f_{3\theta}$, e vice versa.

5.3.5 Válvula de Alimentação

Vimos até agora três fatores que determinam a atividade do centro emocional: a formação dos lotes neurais devido à atividade dos grupos primários, o movimento dos lotes neurais em direção à região crítica, e a variação do grau de degeneração crítico. Há ainda um quarto fator que influencia a atividade do centro emocional: o controle na quantidade de energia por ele recebida. A Figura 5.8 mostra algumas conexões do centro emocional, entre elas, duas que chegam à válvula de alimentação (κ): g_{Σ}^{+} representando um conjunto de conexões excitatórias, que quando ativas abrem a válvula e servem como estímulo; e g_{Σ}^{-} representando um conjunto de conexões inibitórias, que fecham a válvula, servindo como punição.

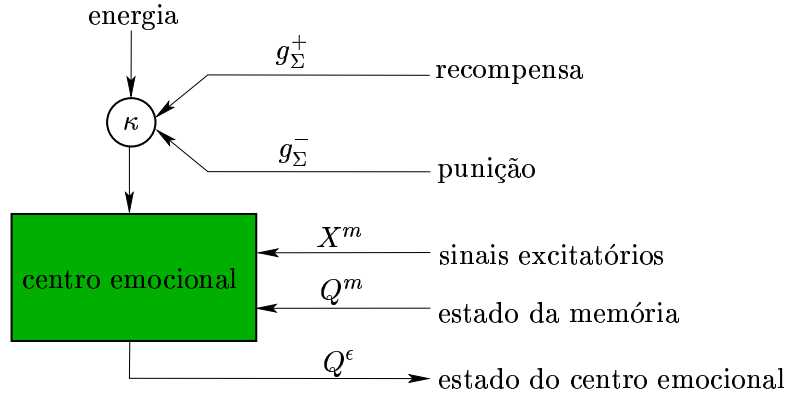


Figura 5.8: Conexões do centro emocional e válvula de alimentação κ extraídas do modelo de agente neuroenergético proposto Emelyanov-Yaroslavsky (Figura 3.1 na página 45).

A influência da válvula de alimentação sobre a saúde do centro emocional $Q^e(H, H')$, e conseqüentemente sobre o agente, é muito grande. Através dela o agente pode interagir com o ambiente num processo de aprendizado supervisionado, em que uma decisão equivocada é punida com o fechamento da válvula e uma decisão correta recompensada com sua abertura. Ao longo do tempo, os diferentes grupos neurais correspondendo a situações externas formam conexões excitatórias (g_{Σ}^{+}) ou inibitórias (g_{Σ}^{-}) com a válvula de alimentação, de acordo com sua avaliação (“boa” ou “ruim”). Desta forma, quando são ativados devido à repetição da situação externa que os gerou, os grupos neurais influenciam diretamente a saúde do agente fechando ou abrindo a válvula de alimentação. Assim, a escolha por seqüências de sinais que aumentem Q^e tende a ser a escolha pelas decisões corretas.

5.4 Dinâmica da Relação entre Centro Emocional e Memória

Durante o regime de vigília, o centro emocional e a memória interagem de maneira a formar um sistema oscilatório. A atividade da memória é modulada através da saúde Q^ϵ do centro emocional, que influencia a formação e extinção dos focos de excitação na memória. No estado “bom” ($Q^\epsilon \gg 0$) a probabilidade de eventos $\mathbf{N}_i^{\mathbf{R}} \Rightarrow \mathbf{N}_i^{\mathbf{S}}$ aumenta¹, e no estado “ruim” ($Q^\epsilon \ll 0$) a probabilidade de eventos $\mathbf{N}_i^{\mathbf{S}} \Rightarrow \mathbf{N}_i^{\mathbf{A}} \Rightarrow \mathbf{N}_i^{\mathbf{R}}$ aumenta. Isto ocorre porque o estado “bom” aumenta a excitabilidade dos grupos neurais (reduzindo Π_E e aumentando Π_R) e o estado “ruim” opera no sentido contrário. Este é o mecanismo pelo qual o centro emocional modula a atividade da memória.

Por outro lado, o estado da memória (Q^m) influencia o valor de Θ_c dos neurônios do centro emocional (Equação (5.2)). Esta influência é tal que quanto maior o valor de Q^m , menor o valor de Θ_c , e conseqüentemente maior o consumo e déficit de energia, e pior a saúde do centro emocional. As interrelações entre memória e centro emocional dão origem ao processo oscilatório representado na Figura 5.9 na próxima página: o estado “bom” no centro emocional cria o estado “ruim” na memória, o estado “ruim” na memória cria o estado “ruim” no centro emocional, que então ativa os grupos neurais da memória com o intuito de extinguir os focos de excitação e criar lá o estado “bom”. Uma vez criado, o estado “bom” na memória cria o estado “bom” no centro emocional, completando o ciclo e formando a base para o próximo ciclo. O agente, no regime de vigília, opera nestes *ciclos de indentação*².

5.4.1 Indentação

Toda indentação consiste de três fases: 1) formação do problema interno (objetivo, desejo) na forma de um conjunto de focos de excitação (intervalo $[t_1, t_3]$); 2) solução deste problema, extinguindo os focos de excitação através da geração em alta frequência (intervalo $[t_3, t_4]$); e 3) avaliação da solução, com a determinação do seu sucesso ou não, e correção para a resolução de problemas futuros (intervalo $[t_4, t_5]$). A Figura 5.10 na página 119 mostra o comportamento das variáveis Q^ϵ , Q^m e n^ϵ que determinam a indentação. A variável n^ϵ indica a quantidade de focos de excitação na memória, e determina o estado operacional da memória, ou seja, a situação dos grupos neurais, enquanto que Q^m indica o estado geral de toda massa neural.

¹ver Seção 5.2.2 na página 104.

²No original, *cycles-paragraphs* ou somente *paragraphs*.

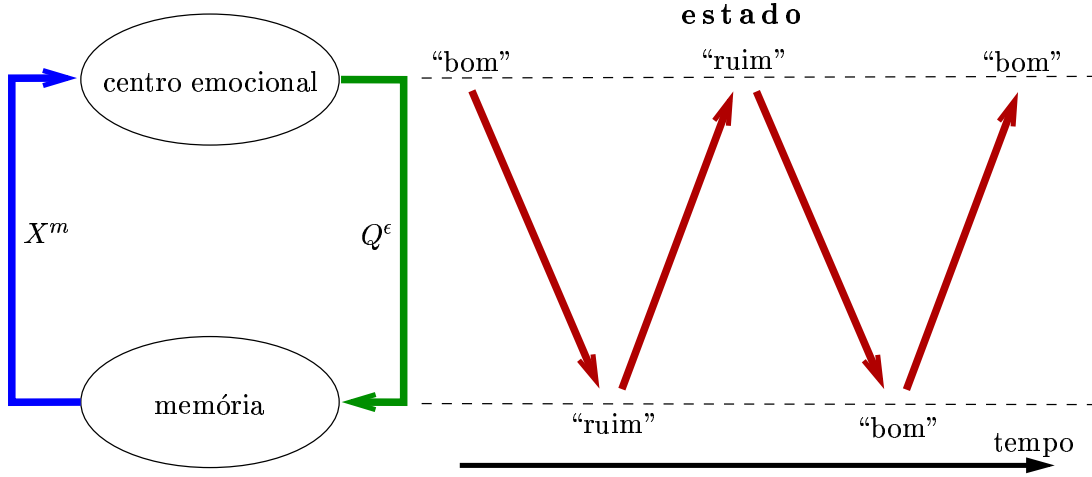


Figura 5.9: Interação cíclica entre a memória e o centro emocional. A memória envia sinais excitatórios X^m para o centro emocional e este influencia a memória com sua saúde Q^ϵ .

5.4.1.1 Fase de Formação do Objetivo

A fase de formação do objetivo tem início no instante t_0 quando Q^ϵ torna-se positivo. A velocidade de crescimento de Q^ϵ será tanto maior quanto melhor tiver sido a indentação anterior. No instante t_1 surge o primeiro foco de excitação com a passagem do grupo neural $\mathbf{N}_i$ ao estado semi-ativo (na verdade, geralmente ainda há focos de excitação da indentação anterior). O evento $\mathbf{N}_i^R \Rightarrow \mathbf{N}_i^S$ ocorre da seguinte maneira:

- a) um neurônio do i -ésimo grupo neural gera um impulso isolado/aleatório;
- b) o neurônio inicia a geração em baixa frequência pois, como Q^ϵ está elevado, o limiar Π_E é baixo;
- c) os impulsos gerados pelo neurônio acumulam um potencial (W^+) nos outros neurônios do grupo;
- d) com a ajuda do potencial, os outros neurônios do grupo conseguem gerar impulsos em baixa frequência, indicando que o grupo passou ao estado $\mathbf{N}_i^S$. Os grupos com maiores chances de passarem ao estado $\mathbf{N}_i^S$ são aqueles que recentemente estiveram no estado ativo (geração em alta frequência), de forma que no instante $[t_1]$ seus neurônios estão no ponto máximo da facilitação pós-tetânica, o que significa que sua excitabilidade é muito alta. Os grupos com a maior excitabilidade são chamados de *dominantes*.

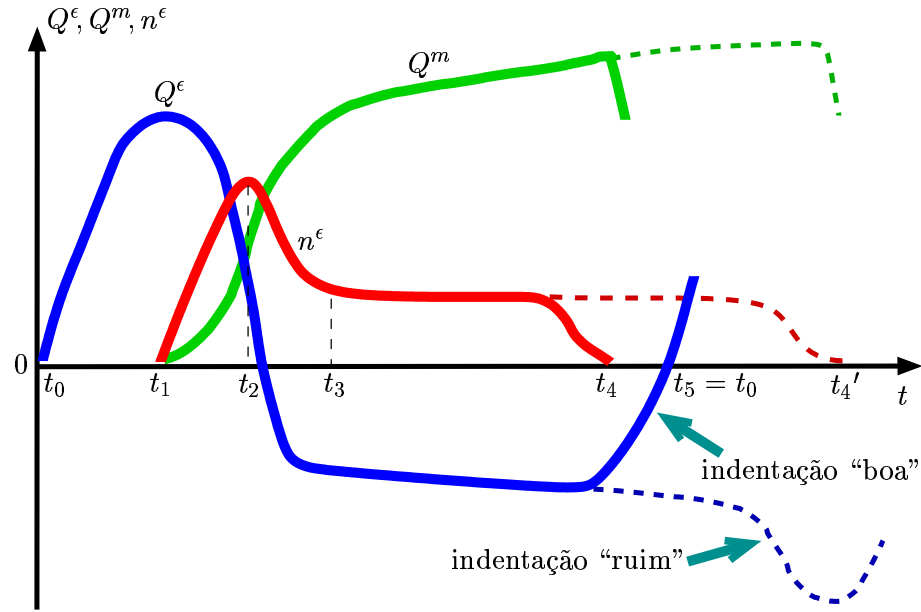


Figura 5.10: Variação da saúde do centro emocional (Q^ϵ), do estado geral da massa neural (Q^m), e da quantidade de focos de excitação (n^ϵ) durante a indentação. A linha cheia mostra uma indentação “boa” (com aumento na saúde do centro emocional), e a linha pontilhada uma indentação “ruim”.

Após a formação do primeiro foco de excitação inicia-se a formação do conjunto $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$ de focos de excitação. Fazem parte deste conjunto os grupos que recebem um potencial excitatório W^+ de grupos que já estão gerando impulsos, ou seja, no conjunto entram grupos semanticamente correlacionados, já que as conexões excitatórias entre os grupos são reflexos da experiência do agente no ambiente. A formação do conjunto $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$ é dividida em duas seções: na primeira (intervalo $[t_1, t_2]$) o número de grupos no conjunto (n^ϵ) aumenta; e na segunda (intervalo $[t_2, t_3]$) n^ϵ diminui devido ao surgimento de eventos $\mathbf{N}_i^S \Rightarrow \mathbf{N}_i^R$. Estes eventos ocorrem quando alguns neurônios do grupo não conseguem mais gerar impulsos devido ao potencial inibitório (W^-) que recebem de outros grupos e/ou devido à redução de Q^ϵ (que aumenta Π_E). É no intervalo $[t_2, t_3]$ que ocorre a disputa entre os grupos neurais pela participação no objetivo final do agente. Para que este objetivo possa ser o mais adequado possível à experiência, é importante que $n^\epsilon(t_2)$ seja de 3 a 4 vezes maior do que $n^\epsilon(t_3)$. O subconjunto de $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$ com maior chance de fazer parte do objetivo é aquele contém dominantes fortes e grupos neurais com conexões excitatórias entre si, refletindo correlação semântica com situações/objetos do ambiente.

5.4.1.2 Fase de Resolução do Problema

A segunda fase da indentação (intervalo $[t_3, t_4]$ na Figura 5.10) tem por objetivo a extinção dos focos de excitação, através da geração de impulsos em alta frequência pelos grupos neurais de $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$. A extinção dos focos está sujeita à condição:

$$\mathbf{N}_i^S + U_i \Rightarrow \mathbf{N}_i^A \Rightarrow \mathbf{N}_i^R, \quad (5.3)$$

ou seja, a mudança de estado do grupo neural está condicionada à adição de um certo valor de potencial U_i que permita aos neurônios ultrapassarem o limiar de refração Π_R . A passagem ao estado de descanso ($\mathbf{N}_i^A \Rightarrow \mathbf{N}_i^R$), por sua vez, se dará quando o limiar estático crescer devido à geração em alta frequência.

Como já vimos, o potencial U necessário para a extinção dos focos de excitação é produzido pela geração em alta frequência por parte dos grupos primários da memória. Estes, por sua vez, recebem excitação dos receptores, e dos próprios grupos secundários semi-ativos, através das conexões compensatórias (Figura 5.4 na página 109). Finalmente, a atividade dos receptores, e também dos elementos motores, é viabilizada devido ao aumento na excitabilidade proporcionado pela redução de Π_R quando $Q^\epsilon \leq Q^\epsilon(t_3)$. A atividade dos elementos motores é fundamental, pois só assim o agente tem condições de procurar no ambiente externo pela situação que corresponda ao estado interno, representado pelo conjunto $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$, de forma a extingui-lo. A estabilização dos valores de Q^ϵ , Q^m e n^ϵ no intervalo $[t_3, t_4]$ é resultado do surgimento de sinais X^m provenientes da memória, que formam os lotes neurais no centro emocional, equiparando a quantidade de neurônios que entra e sai da região crítica. É nesta fase que se forma o fluxo ótimo de excitação.

Há três fatores essenciais para que os grupos primários entrem em atividade: o primeiro é o aumento da excitabilidade devido à redução de Π_R (que ocorre de maneira semelhante para todos grupos primários); o segundo fator é a ocorrência da situação no ambiente que ative os receptores do grupo primário; e o terceiro fator é a correspondência da situação interna do agente, determinada pela composição dos focos de excitação $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$, com a situação externa, para que os grupos de níveis superiores, através das conexões compensatórias, gerem a excitação W^+ que permite aos neurônios do grupos primários ultrapassar o limiar de refração. O agente deve saber combinar a ação do segundo e terceiro fator, o que significa que ele deve criar ou encontrar uma situação no ambiente que seja adequada à situação interna da memória. A combinação de eventos internos e externos é obtida através de ações. Vejamos um exemplo de como esta combinação ocorre.

Suponhamos que o conjunto $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$ contenha os elementos $\mathbf{N}_{I_k}^S$ e $\mathbf{N}_{P_j}^S$ correspondendo à imagem do objeto k e à posição j do campo de visão do agente, respectivamente. O agente sabe

que o objeto k usualmente encontra-se na posição j devido às conexões excitatórias de $\mathbf{N}_{I_k}^S$ a $\mathbf{N}_{P_j}^S$, fortalecidas no processo de formação de $\mathbf{N}_{I_k}^S$. O sistema visual do agente funciona de tal maneira que determinada posição tem tanto mais chances de ser focalizada, quanto maior for a atividade do grupo neural correspondente. Por isso há grande probabilidade de ocorrer:

$$\mathbf{N}_{P_j}^S + U \Rightarrow \mathbf{N}_{P_j}^A \Rightarrow \mathbf{M}_V(y(t) \rightarrow j), \quad (5.4)$$

onde $\mathbf{M}_V$ – operador do sistema visual que realiza a ação de mover o foco de visão da posição atual ($y(t)$) para a posição j , e U – potencial proveniente das conexões de excitatórias de $\mathbf{N}_{I_k}^S$ a $\mathbf{N}_{P_j}^S$.

Se o conhecimento do agente de que o objeto k está na posição j estiver correto, então a realização da ação $\mathbf{M}_V(y(t) \rightarrow j)$ significa que o agente conseguiu combinar o segundo e terceiro fatores mencionados anteriormente: o sistema visual percebe o objeto que esperava, de acordo com a situação interna do agente ($\mathbf{N}_{I_k}^S$), e a excitação decorrente é suficiente para que ocorra o evento de extinção do foco de excitação: $\mathbf{N}_{I_k}^S + U_k \Rightarrow \mathbf{N}_{I_k}^A \Rightarrow \mathbf{N}_{I_k}^R$. Assim, o agente “vê” o que desejava ver, devido ao fato de que encontrou o que procurava, após realizar determinada ação, usando seu conhecimento sobre o ambiente externo.

Neste exemplo, a excitação ao grupo $\mathbf{N}_{I_k}$ chegou de forma direta, através dos grupos primários que foram excitados pelos receptores. Mas a excitação também pode ser indireta. Suponhamos que o conjunto $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$ contenha também outros grupos $\mathbf{N}_{X_k}^S$ relacionados ao objeto k (ao cheiro, à cor, etc.). Então o estado $\mathbf{N}_{I_k}^A$ pode gerar excitação suficiente para que os focos $\mathbf{N}_{X_k}^S$ consigam, devido às conexões excitatórias com $\mathbf{N}_{I_k}$, gerar impulsos em alta frequência. Por isso, devido à excitação direta para a extinção de alguns focos de excitação, e devido ao auxílio mútuo entre os grupos fortemente conectados de $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$, ocorre a extinção de praticamente todos os focos de excitação, com conseqüente melhora na saúde do agente, conforme podemos observar no instante t_4 da Figura 5.10 na página 119. Esta explosão de atividade $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3} \Rightarrow \{\mathbf{N}_i^A\}^{t_4}$ pode ser expressa pelo termo *realização* — a realização do objetivo interno do agente.

Mas a excitação para a extinção dos focos de excitação não precisa ser necessariamente proveniente do ambiente externo. Ela pode surgir devido ao crescimento da condutividade das conexões internas e entre os grupos do conjunto $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$. Isto porque a condutividade das conexões entre neurônios gerando em baixa frequência aumenta (Equação (4.28)), e porque o estado do centro emocional se deteriora, fazendo com que no intervalo $[t_3, t_4]$ o limiar Π_R seja reduzido ao ponto em que os neurônios conseguem passar à geração em alta frequência espontaneamente, sem auxílio externo — a realização será espontânea.

5.4.1.3 Fase de Avaliação da Solução

Na terceira e última fase da indentação (intervalo $[t_4, t_5]$ da Figura 5.10) ocorre sua avaliação. O agente não tem uma maneira direta de avaliar a adequação de seu objetivo ou desejo $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$ à realidade do ambiente externo — uma avaliação direta só poderia ser feita por um observador externo, por um tutor — por isso, ao invés de avaliar a adequação ou o grau de acerto, o agente avalia sua “satisfação”, ou seja, avalia a saúde do centro emocional imediatamente após a fase ativa. O valor dessa “satisfação” pode ser identificado com a velocidade de crescimento das reservas de energia dos neurônios do centro emocional (ou através do crescimento de Q^ϵ), a partir do instante $[t_4]$. Quanto maior o valor de $\partial Q^\epsilon / \partial t$, tanto melhor terá sido a indentação.

A Figura 5.10 mostra dois casos de extinção dos focos de excitação $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$: com sucesso (linha cheia) e sem sucesso (linha pontilhada). Ao primeiro caso corresponde um grau de “satisfação” próximo ao máximo, como indica o crescimento acentuado de Q^ϵ ; e ao segundo caso, nenhuma satisfação. A indentação com sucesso é decorrente tanto do surgimento de excitação externa ou espontânea, quanto das fortes conexões excitatórias entre os grupos de $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$, de forma que em pouco tempo todos os focos de excitação são extintos, e o centro emocional recebe sinais X^m da memória. Como consequência seus neurônios são transferidos para longe da região crítica, levando a um elevado crescimento de Q^ϵ .

Já o caso de insucesso é determinado pelo fato de que os focos de excitação não recebem excitação suficiente para ultrapassar o limiar de refração e/ou devido à fraca associação dos elementos de $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$. Como resultado o estado $\mathbf{N}_i^S$ é prolongado e as reservas de energia dos neurônios da memória são rapidamente consumidas, tornando impossível a passagem ao estado $\mathbf{N}_i^A$. A ausência de sinais da memória deteriora a saúde do centro emocional, e por volta do instante $[t'_4]$ os focos são extintos devido a eventos $\mathbf{N}_i^S \Rightarrow \mathbf{N}_i^R$, sem passar pela geração em alta frequência (estes eventos ocorrem devido à redução de Θ dos neurônios de $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$, decorrente da geração em baixa frequência). A distribuição dos neurônios do centro emocional (n^θ) concentra-se na região crítica e continua a adentrá-la — esta é a penalidade pelo fracasso — produzindo uma redução ainda maior de Q^ϵ , que permite que alguns neurônios ultrapassem espontaneamente o limiar de refração, e alguns grupos primários conseguem entrar em atividade. Com isto formam-se sinais (mas agora não devido aos grupos de $\{\mathbf{N}_i^S\}^{t_3}$) e os neurônios do centro emocional conseguem se regenerar.

5.4.2 Tomada de Decisões e Execução de Ações

O potencial U que permite a extinção dos focos de excitação é formado principalmente pelos receptores, quando o agente encontra no ambiente a situação que esperava. Às vezes é suficiente apenas esperar pela situação desejada, mas geralmente a situação precisa ser efetivamente encontrada ou criada através de ações. Ações podem ser *críticas* ou *não-críticas*. Ações não-críticas são aquelas que não alteram o ambiente, e portanto podem ser executadas com um baixo tônus emocional (Q^e não muito menor que zero). As principais ações não-críticas são: mover o foco de visão para algum lugar do campo visual à procura do objeto desejado; e “falar” em pensamento, ou seja, excitar o sistema auditivo sem produzir sons no ambiente (este é o princípio da auto-excitação que veremos na Seção 5.6).

Por outro lado, as ações críticas são irreversíveis, ou melhor, por alterarem o ambiente, podem implicar num alto custo se seu resultado não for o esperado. Por isso, para realizá-las, é preciso que o tônus emocional ultrapasse um certo limiar de ação: a confiança no sucesso e/ou o “desespero” com a saúde do centro emocional deve sobrepujar o nível de cautela. A necessidade de um elevado tônus emocional é implementada através de uma propriedade especial dos neurônios motores que controlam os atuadores das ações críticas: sua frequência de geração de impulsos depende mais do valor de Q^e do que do potencial U . Assim, os neurônios motores só conseguem gerar impulsos numa frequência alta o suficiente para ativar os atuadores, quando a saúde do centro emocional estiver bastante debilitada.

O alto tônus emocional necessário para as ações críticas é gerado com o auxílio de um *sistema de decisão* composto por quatro grupos neurais especiais, η_1 , η_2 , η_3 e η_4 (ver Figura 3.1 na página 45), que são a memória dos estados internos “melhorando”, “bom”, “ruim” e “piorando”, respectivamente. η_1 , η_2 , η_3 e η_4 entram em atividade quando correspondem ao estado do agente, e assim associam grupos neurais da memória ativos simultaneamente a este estado. Através destas associações entre o sistema de decisão e grupos neurais da memória, o agente é capaz de avaliar seus desejos/objetivos internos, representados pelos focos de excitação. Se os focos ativarem os grupos correspondentes aos estados “bom” e/ou “melhorando”, então as chances de a ação desejada trazer benefícios é grande, e o sistema de decisão amplifica o tônus emocional, facilitando a execução da ação. No caso de os grupos ativados serem “ruim” e/ou “piorando”, o sistema de decisão reduz o tônus emocional.

5.4.2.1 Mecanismo de Ação – η_1

O primeiro grupo neural do sistema de decisão, η_1 , é o *mecanismo de ação*. A atividade deste grupo indica o estado “melhorando”, e que o agente tomou a decisão de executar uma ação crítica. O grupo η_1 forma-se a partir da excitação proveniente da avaliação positiva da indentação, ou seja, é excitado por receptores que detectam o grau de **crescimento** da saúde do agente no instante $[t_4]$ da indentação (denotamos este crescimento por $Q_{t_4}^{\epsilon+}$). Quanto maior for $Q_{t_4}^{\epsilon+}$, tanto mais excitação chega a η_1 e maior será a probabilidade de ele passar ao estado ativo. Além disso, η_1 também é influenciado pelos grupos η_2 – que indica o grau de “confiança”, e η_3 – que indica o grau de “cautela”, como veremos mais adiante.

A principal função de η_1 é a de rapidamente reestabelecer a capacidade de ação do agente após uma indentação boa, quando ele poderia ficar inativo por algum tempo devido ao alto valor de Q^ϵ . Para tanto, η_1 influencia o valor de Q^ϵ através da variação de Θ_c dos neurônios do centro emocional, expressa pela Equação (5.2). Como vimos, o primeiro termo desta equação ($f_{1\theta}$) é responsável por mover a região crítica à frente do lote neural, possibilitando ao agente ajustar-se a pequenas variações no ambiente. O mecanismo de ação é responsável pela introdução de um coeficiente Ω_{η_1} no primeiro termo da equação, com a função de inibir ou até mesmo inverter a variação de Θ_c :

$$\frac{\partial \Theta_c}{\partial t} = \Omega_{\eta_1} f_{1\theta}(Q) + f_{2\theta}(\Theta) + f_{3\theta}(Q^m). \quad (5.5)$$

O valor do coeficiente Ω_{η_1} depende do estado do grupo η_1 : no estado inativo, $\Omega_{\eta_1}=1$ não altera a variação de Θ_c ; mas no estado ativo, quanto maior a frequência de geração de impulsos de η_1 , tanto menor o valor de Ω_{η_1} . Desta forma, quando $\Omega_{\eta_1}=0$, Θ_c mantém-se imóvel ante a aproximação de um lote neural, e quando $\Omega_{\eta_1}<0$, a região crítica move-se ao encontro do lote, deteriorando rapidamente a saúde do centro emocional e gerando um grande tônus emocional — condição *sine qua non* para a execução de ações críticas.

5.4.2.2 Grau de Confiança – η_2

O grupo neural η_2 indica o grau de confiança do agente em tomar determinada decisão. Ele é ativado no estado “bom” da memória, a partir das excitações provenientes de receptores que detectam a intensidade do crescimento de $\overline{H}-H_N$, ou seja, que detectam o quanto a reserva média de energia dos neurônios da memória ($\overline{H}$) está **acima** do valor normal H_N (representamos esta diferença positiva por $\overline{H}_N^{m+}$). Quanto maior o valor de $\overline{H}_N^{m+}$, tanto mais excitação η_2 recebe, e maior a probabilidade de ele entrar no estado ativo. A atividade de η_2 produz excitação para o

grupo η_1 (devido às conexões excitatórias pré-programadas de η_2 para η_1), e desta forma auxilia na formação do tônus emocional.

5.4.2.3 Grau de Cautela – η_3

O grupo η_3 tem função oposta ao grupo η_2 . Ativado no estado “ruim” da memória, η_3 indica o grau de cautela que o agente deve ter ao tomar uma decisão, e o faz dificultando o aumento do tônus emocional, através de conexões inibitórias pré-programadas com o grupo η_1 . A excitação que ativa η_3 é proveniente de sensores que detectam a redução de $\bar{H} - H_N$ (que representamos por $\bar{H}_N^{m-}$). Quanto menor o valor de $\bar{H}_N^{m-}$ tanto mais excitação η_3 recebe, e tanto mais difícil fica para o grupo η_1 entrar em atividade.

5.4.2.4 Mecanismo de Proteção – η_4

O mecanismo de proteção, η_4 , corresponde ao estado “piorando”, e recebe excitação quando $\partial Q^\epsilon / \partial t_4 \ll 0$, ou seja, de acordo com o grau de **redução** da saúde do centro emocional no instante $[t_4]$ da indentação (denotamos esta redução por $Q_{t_4}^{\epsilon-}$). A função de η_4 é evitar que a saúde se deteriore a ponto de ocorrerem eventos letais nos neurônios do centro emocional. Para tanto, a atividade de η_4 aumenta o valor de Q^ϵ abrindo completamente a válvula de alimentação κ . O aumento na alimentação permite que os neurônios permaneçam na região crítica por mais tempo, até que um sinal da memória os leve novamente ao início da distribuição n^θ .

5.5 Regime de Subconsciência

A memória do agente é formada pelo conjunto dos vários grupos neurais. O volume principal da memória é ocupado por grupos secundários e terciários (de terceiro nível), que correspondem a objetos e situações no ambiente externo, e às noções concretas e abstratas sobre as propriedades deste ambiente. Uma das principais forças que move o processo de surgimento de propriedades “inteligentes” no agente que é sua limitação na capacidade de memória. O ambiente externo é muito diverso, de forma que o agente não consegue memorizar todos os detalhes e sua reação a eles. Por isso, ao invés de memorizar situações concretas, o agente precisa lembrar de regularidades, e, em seguida, criar conceitos mais genéricos e abstratos. O problema de generalização no agente

neuroenergético é resolvido sob a forma de um problema de minimização dos grupos neurais da memória, da seguinte maneira:

- A condutividade das conexões excitatórias decresce gradualmente na ausência de impulsos. Conseqüentemente, a condição para a existência de grupos neurais é que entrem em atividade periodicamente, prevenindo que sua condutividade decresça abaixo de um mínimo. Há um certo intervalo de tempo T , durante o qual a condutividade decresce do valor normal ao valor mínimo. Desta forma, para continuar existindo, cada grupo neural deve entrar em atividade ao menos uma vez a cada intervalo T . A memória total do agente, seu *vocabulário*, é dividido em duas partes: ativo e passivo. Grupos neurais do vocabulário ativo entram em atividade freqüentemente durante o regime de vigília, pois são excitados diretamente pelo ambiente, ao passo que os grupos do vocabulário passivo são bloqueados e não conseguem entrar em atividade.
- A excitabilidade de um grupo neural, isto é, a probabilidade de ocorrer a passagem $\mathbf{N}_i^R \Rightarrow \mathbf{N}_i^S$, depende, entre outras coisas, do grau de degeneração Θ dos seus neurônios. O crescimento de Θ nos grupos do vocabulário passivo poderia fazer com que eles entrassem em atividade. Mas, durante o regime de vigília, eles são bloqueados pela atividade dos grupos do vocabulário ativo, e durante o regime de sono eles são bloqueados pela atividade dos GAMs (isto porque a maior parte dos neurônios da massa neural não faz parte da memória, e por isso forma conexões inibitórias com os neurônios dos grupos neurais).
- Assim sendo, o agente precisa de um regime especial para possibilitar a regeneração do vocabulário passivo (nem sono, nem vigília), no qual os neurônios sejam excitados principalmente por seus altos valores de Θ . Este regime, chamado de *subconsciência*, é obtido pela separação da massa neural em partes fracamente interconectadas, por exemplo, em hemisférios, de forma que um hemisfério possa estar no regime de vigília enquanto outro está no regime de sono. A subconsciência surge no hemisfério que está no regime de vigília, e é o modo autônomo de funcionamento da memória, sem as influências do centro emocional e sem a excitação dos sistemas receptores. O centro emocional e os receptores são bloqueados pela forte geração de impulsos por parte dos GAMs do hemisfério que está no regime de sono (Figura 5.11 na página oposta). O regime de subconsciência dura pouco tempo, e é até certo ponto semelhante ao período de sono de animais e humanos. A fila de regeneração dos grupos do vocabulário passivo move-se apenas no regime de subconsciência, e a cada período, apenas uma pequena parte da fila consegue entrar em atividade. O fato de que

toda fila deve entrar em atividade num tempo menor do que T , é o fator que restringe a capacidade de memória do agente.

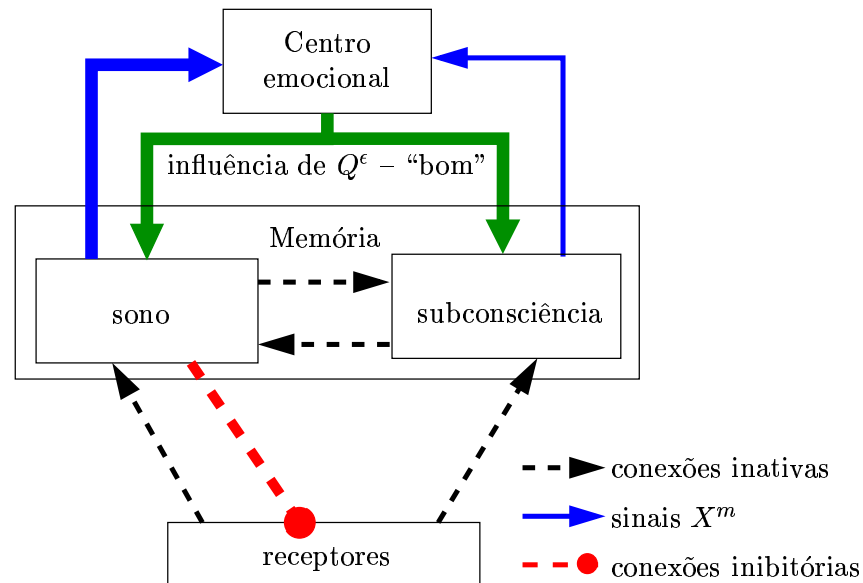


Figura 5.11: Interconexão das unidades do agente durante o regime de subconsciência

- A regeneração dos grupos neurais no regime de subconsciência ocorre durante a geração de impulsos em alta frequência, que só é possível se houver forte associação entre os grupos. A subconsciência caracteriza-se pela formação e luta de vários conjuntos de grupos neurais, pela busca por aliados e a superação de oponentes, que são delineados pela experiência do agente, refletida nas conexões neuronais. Como resultado, novas conexões excitatórias e grupos neurais são formados, alterando o modelo interno do ambiente, o que ocorre devido ao processamento de experiências acumuladas, e não como resultado direto de experiências. A otimização das relações entre os grupos neurais tende a transformar-se em uma otimização lógica das estruturas de conhecimento, levando à sua generalização. Quando o agente entra no regime de vigília, ele procura no ambiente externo a confirmação para suas novas “idéias”. Se confirmadas, serão fortalecidas, senão, vão desaparecer.
- A prioridade dos grupos neurais na fila, durante a subconsciência, não é determinada apenas pelo seu grau de degeneração, mas também pelos dominantes, isto é, por grupos do vocabulário ativo, correspondendo a tarefas difíceis, que não foram resolvidas pelo agente no regime de vigília anterior. Isto significa que estes dominantes têm grande probabilidade de tornarem-se o centro dos focos de excitação durante regime de subconsciência, quando o

agente vai continuar a resolver o problema. No regime de subconsciência as influências do ambiente (via receptores) não atrapalham o agente, ao mesmo tempo em que analogias bem distantes e indiretas das mais diversas áreas da experiência são acessíveis.

- No regime de subconsciência o agente procura por soluções novas, mais simples e gerais para problemas externos e, se encontra tais soluções, ele forma novas estruturas de memória para elas. A atividade das novas estruturas bloqueia a atividade das antigas para o mesmo problema, tanto no regime de vigília quanto no de subconsciência, impedindo assim a regeneração das estruturas antigas e liberando espaço para novos conhecimentos. Este é o mecanismo de solução do problema de minimização de memória do agente.

Assim, do ponto de vista do desenvolvimento “intelectual”, durante o regime de subconsciência são resolvidos os seguintes problemas: 1) regeneração do vocabulário passivo; 2) otimização da memória; e 3) formação de novas hipóteses.

5.5.1 Regeneração do Vocabulário Passivo

Todos os grupos neurais da memória cedo ou tarde tornam-se focos de excitação devido à sua excitabilidade espontânea, e desta forma renovam suas conexões. Por causa disso, os grupos do vocabulário passivo permanecem na memória por muito tempo, mesmo sem participar de contextos ativos. Há três fatores que determinam a capacidade máxima de memória do agente, em função da quantidade de grupos que podem ser regenerados: 1) a duração do período entre as regenerações dos grupos, determinado pela velocidade de redução da conectividade das conexões inativas; 2) a duração do processo de regeneração; e 3) a duração do regime de subconsciência. A quantidade de neurônios não tem muita influência na capacidade de memória, pois a maior parte dos neurônios não participa da memória. Sua função é a de ser um lastro: quanto maior o lastro, mais difícil fica a manutenção do agente num ambiente com energia limitada, e mais eficiente deve ser sua memória.

5.5.2 Otimização da Memória

Se a capacidade de memória é limitada, o ambiente é complexo e dinâmico, e é necessário que o modelo interno seja suficientemente adequado para “prever” os acontecimentos, então a tarefa de otimização da memória surge a partir da necessidade. A otimização da memória pode ser vista sob três aspectos:

- a passagem de uma memorização de elementos concretos do ambiente externo, para a detecção e memorização de regularidades na formação de diferentes elementos concretos, a partir de um vocabulário básico;
- a compreensão das transformações do ambiente, das gramáticas de transformação, e a fixação destas gramáticas na memória;
- a construção de um sistema de conhecimento, isto é, de um modelo interno de conceitos generalizados, que são uma abstração de eventos/elementos concretos.

O mecanismo de otimização da memória é baseado na característica dos neurônios de criarem conexões excitatórias quando geram impulsos simultaneamente, e tende a produzir uma otimização lógica pois grupos mais eficientes ou gerais substituem aqueles que representam o mesmo conhecimento.

5.5.3 Formação de Novas Hipóteses

Uma das principais propriedades dos sistemas inteligentes naturais é sua capacidade de encontrar soluções inéditas para problemas que lhe são apresentados, isto é, soluções que não sejam simplesmente decorrentes de processos indutivos ou dedutivos. A formação de novas hipóteses está, até certo ponto, presente no agente neuroenergético, e ocorre durante o regime de subconsciousiência, quando diversos grupos neurais têm a possibilidade de entrar em atividade simultaneamente, mesmo não estando correlacionados no ambiente externo. Sua atividade é consequência da alta excitabilidade devida ao seu grau de degeneração, de forma que conceitos muitas vezes “distantes” ou provenientes de diferentes zonas da memória, formam associações e dão origem a novos grupos neurais.

Mas não há garantias de que as hipóteses formadas desta maneira correspondam efetivamente à realidade, e esta correspondência precisa ser confirmada para que o novo conhecimento seja fortalecido e incorporado à memória. Quando o agente entra novamente no regime de vigília, as associações recém formadas auxiliam os respectivos grupos neurais a fazerem parte do desejo interno do agente ($\{\mathbf{N}_i^{\mathbf{S}}\}^{t_3}$), que ao ser realizado, dá origem a uma indentação “boa”, fortalecendo as conexões. É importante ressaltar que a formação de hipóteses não está sob o controle do agente, mas ocorre de forma espontânea e independente, uma vez que o mecanismo de volição (centro emocional) e os receptores, estão desativados. A tarefa do agente, no que tange a formação de hipóteses, é a de prover os meios para que ela ocorra, isto é: um regime de funcionamento em

que a memória não seja controlada nem excitada pelo ambiente, e a formação de uma base de conhecimento suficientemente grande.

5.6 Sistema de Auto-excitação

Durante o regime de vigília, a atividade do agente se caracteriza pela busca de satisfação dos seus desejos internos $\{\mathbf{N}_i^{\mathbf{S}}\}^{t_3}$ através da entrada de excitação externa. Para formar o fluxo ótimo de excitação, é necessário que haja uma seqüência contínua e intensa na atividade dos grupos neurais. Isto deixa o agente numa relação de grande dependência com ambiente, uma vez que as situações externas devem corresponder à situação interna $\{\mathbf{N}_i^{\mathbf{S}}\}^{t_3}$. Mas existe outra maneira de satisfazer os desejos do agente além de encontrar ou criar no ambiente a situação desejada: criar uma “imitação” do ambiente. Isto ocorre quando o agente, no processo de *auto-excitação*³, imita o ambiente, “imaginando” o que gostaria de “ver”, ou seja, é uma espécie de fala monóloga: o agente “fala” a si mesmo o que gostaria de “ouvir”, a fim de que os receptores sejam excitados e ele consiga eliminar os focos de excitação. Entenda-se por fala, do ponto de vista energético, a liberação da dependência de excitação externa por meio de um ciclo interno, independente, em que a informação desejada é transformada na sua contrapartida externa, real. Desta forma, a auto-excitação garante a continuidade entre as indentações, e uma relativa constância no fluxo de excitação mesmo em ambientes empobrecidos ou inacessíveis.

Uma característica especial do sistema motor que permite o surgimento da auto-excitação é o fato de que os atuadores relacionados a ela fazem parte das ações não-críticas, podendo entrar em atividade quando os grupos primários associados a eles encontram-se no estado semi-ativo $\mathbf{S}$ (intervalo $[t_3, t_4]$ da indentação). Quando o atuador entra em atividade, os receptores conectados a ele são excitados e o agente “percebe” o que gostaria de perceber. Na presença de dominantes fortes, o processo de auto-excitação não é espontâneo, mas dirigido, com o objetivo de eliminar os dominantes.

A auto-excitação só é possível se o agente já tiver um grande vocabulário, isto é, uma grande quantidade de grupos neurais representando o ambiente externo. Mais especificamente, a auto-excitação é baseada na formação de um *vocabulário de nomes* na memória. Estes nomes estão relacionados a objetos e situações, inicialmente representados por seus grupos neurais nas diversas regiões da memória, em várias zonas e níveis hierárquicos. Quando o i -ésimo grupo do vocabulário de nomes entra em atividade, ele gera excitação para os grupos relacionados a ele, por exemplo,

³no original, *second signal system* ou *speech mechanism*.

para o grupo visual, de forma que este também consegue entrar em atividade, e na memória surge a “imagem” do i -ésimo objeto.

Os grupos do vocabulário de nomes pertencem ao mesmo nível hierárquico, e estão na mesma zona da memória, de forma que podem facilmente formar conexões associativas. Como resultado, grupos neurais de regiões fracamente conectadas da memória podem formar conexões através de seus nomes, se isto corresponder à realidade (por exemplo: as noções de “azul” e “frio”, “afiado” e “ferro”), ampliando as perspectivas de associações. Também é importante observar que devido aos nomes, o nível hierárquico de noções complexas diminui.

5.7 Resumo

Neste capítulo apresentamos o modelo de um agente baseado nas redes neurais neuroenergéticas. Ele é composto por três blocos principais: massa neural, memória e centro emocional, e a partir do funcionamento e relacionamento destes blocos, surgem no agente características “inteligentes” como: capacidade de memorizar o ambiente, otimização da memória através de generalizações, auto-controle, formação e satisfação de objetivos, etc. A seguir abordamos os principais aspectos do agente:

- A memória é composta por grupos neurais que se separam da massa neural devido à atividade dos receptores. Os grupos neurais formam-se em diversos níveis hierárquicos e correspondem a objetos ou situações do ambiente externo. Sua principal função do ponto de vista energético é produzir um fluxo ótimo de excitação que permita à massa neural reduzir o consumo de energia durante o regime de vigília. Eles podem encontrar-se em um de três estados: descanso, semi-ativo e ativo.
- O centro emocional é formado por um conjunto de neurônios especiais que não podem formar conexões entre si e conseqüentemente dependem de excitações provenientes da memória para se regenerar. A função do centro emocional é dirigir a atividade da memória através do seu principal parâmetro, a saúde Q^e . As variações na saúde do centro emocional influenciam a atividade dos grupos neurais da memória, aumentando ou diminuindo sua excitabilidade.
- O relacionamento entre memória e centro emocional durante o regime de vigília forma um sistema oscilatório em que se alternam estados “bom” e “ruim” em ambos os blocos. Na memória do agente formam-se os objetivos ou desejos do agente sob a forma de focos de

excitação, formados quando lotes neurais do centro emocional adentram a região crítica. Os focos de excitação são extintos quando a memória recebe a excitação necessária para ativá-los.

- Para executar ações críticas (que alteram o ambiente) o agente precisa formar um grande tônus emocional, tarefa na qual é auxiliado por quatro grupos neurais especiais: mecanismo de ação (η_1), grau de confiança (η_2), grau de cautela (η_3), e mecanismo de proteção (η_4).
- Para regenerar os grupos neurais que não tiveram a chance de entrar em atividade durante o regime de vigília, introduzimos o regime de subconsciência, que surge a partir da divisão da massa neural em dois hemisférios fracamente interconectados, quando um hemisfério entra no regime de sono e outro no regime de vigília. É no regime de subconsciência que ocorre o processo de otimização da memória a partir da formação de novos grupos neurais mais eficientes ou gerais.
- Finalmente, o agente é capaz de auto-excitar-se quando não encontra no ambiente a situação necessária para a extinção dos seus focos de excitação. A auto-excitação é um processo em que o agente ativa atuadores que agem diretamente sobre seus receptores, de forma que ele “fala” para “ouvir” o que gostaria.

Capítulo 6

Análise do Agente Neuroenergético

*But then arises the doubt: can the mind of man,
which has, as I fully believe, been developed from a mind
as low as that possessed by the lowest animal,
be trusted when it draws such grand conclusions?*

(Charles Darwin)

6.1 Introdução

Os modelos do neurônio, da rede neural e do agente neuroenergético apresentados nos capítulos anteriores certamente apresentam propriedades muito interessantes, com perspectivas promissoras no sentido de construir sistemas cognitivos. O propósito deste breve capítulo é o de analisar estes modelos um pouco mais a fundo, ressaltando suas principais qualidades e também apontando suas falhas, tendo em vista os conceitos da semiótica Peirceana (Capítulo 2) e os outros modelos de sistemas inteligentes, apresentados no Capítulo 1.

6.1.1 Organização do Capítulo

Na Seção 6.2 analisamos o neurônio neuroenergético e a rede decorrente de sua interconexão, fazendo uma comparação com os neurônios e as redes neurais artificiais clássicas. Na Seção 6.3 comparamos as principais características do agente neuroenergético com outros sistemas inteligentes artificiais, e avaliamos a ocorrência de processos de inferência semióticos. Finalmente na Seção 6.4 apresentamos um resumo do capítulo.

6.2 Neurônio e Rede Neuroenergética

A principal contribuição do conceito neuroenergético de inteligência, sua característica mais marcante, é a organização e definição de todo o sistema em função do problema de otimização do consumo de energia. Ao abordar a criação de um sistema neural por esta perspectiva, o modelo é capaz de fornecer ao neurônio neuroenergético um mecanismo de auto-controle que o diferencia dos demais neurônios artificiais, pois cada neurônio possui um objetivo interno que guia todo o seu funcionamento. Enquanto dados/impulsos de entrada são o fator determinante do comportamento nos neurônios artificiais clássicos, os neurônios neuroenergéticos apenas utilizam os impulsos externos como meio para alcançar seu objetivo.

A geração de impulsos também é encarada de maneira inovadora, ao ser associada a um processo de regeneração que permite uma redução no consumo, ao invés de objetivar a transmissão de dados. Por questões de simplificação, os neurônios neuroenergéticos operam em tempo discreto, e a transmissão de impulsos se dá pela média de impulsos gerados num intervalo de tempo. De acordo com Gerstner (2002), os neurônios de “integração e disparo”¹ ou *spiking neurons* conseguem simular melhor o funcionamento dos neurônios biológicos pois operam paralelamente, e assim possuem uma maior capacidade de representação. Mas da mesma forma que os neurônios *perceptron*, os *spiking neurons* também não possuem qualquer tipo de auto-controle, tendo sua atividade completamente determinada pela entrada de impulsos.

Uma das principais deficiências do neurônio neuroenergético talvez seja a intrincada gama de equações e restrições que regem seu comportamento. Devido à grande interdependência entre as equações, o sistema torna-se de difícil configuração e ajuste, de forma que métodos menos empíricos do que os atualmente utilizados fazem-se necessários. Também o tempo de processamento tende a ser proibitivo em redes com muitos neurônios, como as que seriam necessárias para a construção de um agente. O principal custo computacional reside na atualização das conexões interneuronais (Equações 4.24–4.28), embora algumas variáveis do neurônio também sejam calculadas por funções custosas. Edelman (1987) na teoria da seleção de grupos neurais ameniza o problema do custo computacional ao utilizar como unidade básica de sua rede um grupo neural, e não o neurônio individual. Mas esta abordagem não pode ser implementada diretamente nas redes neuroenergéticas pois, ao contrário do que ocorre nas redes de Edelman, novos grupos neurais podem ser formados a partir de neurônios inicialmente desorganizados.

A capacidade de auto-controle dos neurônios neuroenergéticos traz como consequência sua

¹ *integrate and fire*

auto-organização para a formação de uma rede. As conexões interneuronais são alteradas seguindo um mecanismo semelhante ao utilizado pelas redes de Kohonen (Haykin, 1994), em que neurônios interconectados gerando impulsos simultaneamente têm suas conexões fortalecidas. Não há portanto um algoritmo de treinamento que opere externamente sobre toda a rede, como é o caso das redes *feed-forward*. A principal diferença em relação às redes auto-organizáveis de Kohonen é que a organização da rede neuroenergética, num primeiro momento, não se dá em função dos impulsos de entrada. Estes são apenas introduzidos num segundo momento, na construção do agente, para permitir o surgimento de funções de alto nível como memória, volição, etc. Mas a principal motivação para a introdução de impulsos externos, do ponto de vista dos neurônios e da rede, não é o surgimento de “inteligência”, mas sim a redução no consumo de energia.

6.3 Agente Neuroenergético

O agente neuroenergético não é mera consequência de um processo de auto-organização dos neurônios. Ele possui uma estrutura pré-programada por um projetista, na qual há regiões específicas de grupos neurais primários que controlam, ou melhor, são ativados/ativam os receptores e atuadores do agente. A criação destes grupos primários poderia ocorrer de maneira semelhante à que ocorre na criação do repertório primário do agente proposto por Edelman, simulando o que na natureza é determinado pelo código genético e pelas influências aleatórias do ambiente. Os grupos primários respondem a determinados estímulos de entrada, e devem ser suficientemente numerosos e variados para que diversos grupos possam responder a um mesmo padrão de impulsos (propriedade da *degeneração*, Seção 1.3.5, que serve também como proteção contra falhas individuais ou localizadas). Desta forma, o agente é capaz de iniciar uma categorização do seu *umwelt*, através da seleção de quais grupos serão efetivamente ativados (focos de excitação), e assim construir sua própria ontologia. É importante destacar que a pré-definição dos grupos primários não implica na criação de uma ontologia para o agente, haja vista que não há uma relação direta entre um estímulo e determinado grupo neural.

Os conceitos de repertório secundário e reentrância, fundamentais na teoria da seleção de grupos neurais, também podem ser identificados no agente neuroenergético, durante a formação de grupos neurais de níveis superiores. Estes grupos de níveis superiores num primeiro momento dão origem aos mapeamentos, ao interligarem diversos grupos primários excitados simultaneamente por sensores/atuadores de um mesmo tipo. Num segundo momento, formam-se grupos neurais que associam grupos de zonas diferentes da massa neural, provendo assim a necessária coordenação entre

os diversos tipos de receptores e atuadores. A ligação de receptores com atuadores é fundamental para o agente, pois para ele o processo de sensoriamento não pode ser uma atividade passiva. A necessidade de excitação para a redução do consumo exige que ele seja capaz de procurar ativamente pela excitação desejada, através de atividades sensório-motoras coordenadas.

Sendo o agente neuroenergético capaz de criar sua própria ontologia, não é possível afirmar quais características do ambiente são efetivamente diferenciadas ou classificadas por ele. A visão que o agente tem do seu *umwelt* lhe é particular, não sendo igual nem mesmo a outro agente do mesmo tipo (devido às variações aleatórias nas equações). Desta forma, o agente escapa do problema de falta de fundamento simbólico, pois tem sua representação diretamente baseada na experiência. E como é capaz de alterar sua ontologia por conta própria, também o problema da visão de referência atinge o agente em menor escala. Outro grande problema da IA Simbólica, o problema do enquadramento, é mais perceptível no agente, pois ele mantém um modelo do ambiente através da memória, e seus objetivos (focos de excitação) formam-se a partir deste modelo. Mas a dependência ao modelo é reduzida pelo fato de o agente ser contextualizado, isto é, capaz de interagir com o ambiente e tomar decisões a partir da situação que encontra. Além disso ele é capaz de adaptar-se às alterações do ambiente através da variação de Θ_c dos neurônios do centro emocional e através de mudanças nas conexões sinápticas de seus neurônios.

Quando Emelyanov-Yaroslavsky & Potapov (1992b) falam da formação de memória na rede neuroenergética, eles fazem uma associação direta do evento ou impulso com um ou mais grupos neurais que este estímulo originou. Desta forma acabam atribuindo uma representação simbólica ao agente, ao afirmar que os eventos/objetos do ambiente são representados em diferentes grupos neurais. Mas esta visão está equivocada, e deve-se provavelmente à limitação e simplicidade dos experimentos de criação de memória efetuados pelos autores², e à forte influência da IA Simbólica ainda presente no seu trabalho. A interpretação mais correta do que seja memória no agente neuroenergético pode ser extraída da teoria de Edelman, segundo a qual “memória é o resultado de constantes recategorizações nos mapeamentos globais” (Verschure, 1993). Ou seja, a memória não deve ser vista como um conjunto de “imagens” armazenadas em grupos neurais, mas como uma “habilidade aprimorada de reagir de certa maneira a certos estímulos” (Franklin, 1995, pág. 308).

Mas a diferença mais significativa entre o agente neuroenergético e o modelo de Edelman (como Darwin III por exemplo) diz respeito ao sistema de valores que guia a atividade dos agentes.

²Os únicos testes computacionais de formação de memória estão descritos em Emelyanov-Yaroslavsky & Potapov (1992b), e são dirigidos de tal maneira (com manipulação direta de conexões interneuronais) que os autores acabam por criar uma memória em que cada grupo neural representa um símbolo.

Darwin III possui valores adaptativos embutidos, redes especializadas que refletem o que ele pensa sobre ações e sensações, o que dói e o que é bom. Estes valores dirigem seu processo de seleção, a modificação das sinapses, numa espécie de aprendizado por reforço, com reforço interno. A regra de Hebb ou algum outro mecanismo de aprendizado está operando com parâmetros determinados pelo sistema de valores” (Franklin, 1995).

O agente neuroenergético por sua vez, não possui um sistema de valores pré-determinado pelo projetista. O que determina a “opinião” do agente sobre ações e sensações é a capacidade destes eventos de aumentar sua saúde. O centro emocional não pode ser comparado ao sistema de valores, pois apesar de controlar a atividade do agente, efetua este controle baseado em parâmetros criados pela necessidade de redução de energia, e não por algum tipo de classificação prévia. O agente neuroenergético está submetido a um aprendizado por reforço (Kaelbling *et al.*, 1996), mas os valores que guiam este aprendizado são determinados pelo próprio agente, e não pelo projetista. Não obstante, há a possibilidade de intervenção no processo de aprendizado através da abertura/fechamento da válvula de alimentação por parte de um tutor, enquanto que o modelo de Edelman não prevê mecanismos para interações neste sentido.

O processo de aprendizado do agente neuroenergético está embutido na sua estrutura neural, e não depende de algum módulo específico. Memória, sensoriamento, ação, aprendizado, formação de desejos e intenções, estão todos interligados através da associação dos diversos grupos neurais da memória e de sua atividade conjunta; diferentemente do que ocorre em agentes com arquitetura BDI por exemplo, nos quais há uma nítida divisão entre estes elementos. Assim o agente neuroenergético tem um funcionamento muito próximo ao defendido pela teoria autopoietica, com grande interdependência e interrelação entre a estrutura e as funções, o que de acordo com esta teoria é um pré-requisito para o surgimento de capacidades cognitivas.

6.3.1 Sob a Ótica da Semiótica

Do ponto de vista da semiótica também há algumas colocações importantes a serem feitas. Em primeiro lugar o auto-controle dos neurônios, baseado num processo de otimização de consumo de energia, lembra muito a categoria da terceiridade de Peirce, que é categoria da ação mediadora, da ação inteligente que guia o processo sógnico (a ação bruta é a secundidade, e a mera possibilidade é a primeiridade). Do ponto de vista da semiótica peirceana, o neurônio pode ser considerado inteligente, pois sua atividade é mediada. Mas neste caso a semiótica não nos ajuda muito, pois ela caracteriza determinado sistema como sendo ou não inteligente dependendo de sua ação ser mediada

ou não. O que precisamos é de um sistema que permita quantificar os níveis de inteligência de um sistema. Gudwin (2000) sugere um método de classificação que utiliza tanto a estrutura do agente quanto a quantidade de signos que ele é capaz de processar como sendo uma possível medida. Mas as arquiteturas propostas por ele são arquiteturas clássicas de agentes, com subdivisões bastante nítidas entre seus módulos, o que não ocorre no agente neuroenergético. Além disso, uma vez que o agente é capaz de criar sua própria ontologia, e classifica seu ambiente de uma maneira que lhe é particular, pode não ser possível a um observador externo analisar os tipos de signo com os quais o agente opera.

Optamos portanto por analisar a capacidade do agente de criar novos signos, ou seja, procuramos identificar nele os três tipos de raciocínio que compõem o processo de investigação científica: abdução, dedução e indução. Antes porém, é necessário lembrar que estes processos não são independentes uns dos outros, nem tem fronteiras muito nítidas entre si, mas estão intimamente interconectados.

Vimos que o raciocínio abdutivo é o único capaz de introduzir novas hipóteses. Os sistemas artificiais têm sua maior deficiência justamente neste tipo de raciocínio, pois geralmente operam sobre hipóteses já formadas, expandindo-as ou generalizando-as, e devem a isto sua pequena capacidade de reagir a situações inesperadas. Gudwin sugere que um processo evolutivo baseado em algoritmos genéticos é capaz de introduzir novas hipóteses num sistema, e por isso pode ser considerado como uma espécie de raciocínio abdutivo. O agente neuroenergético não utiliza processos evolutivos (a não ser talvez na sua criação/configuração), mas também é capaz de efetuar raciocínios abduativos, e, curiosamente, de uma maneira relativamente “inconsciente”, como Peirce afirma ocorrer no cérebro.

Consideramos que o raciocínio abdutivo no agente neuroenergético ocorre especialmente durante o regime de subconsciência (Seção 5.5), quando diversos grupos neurais não correlacionados pela experiência têm a possibilidade de criar conexões excitatórias entre si, e assim alterar a representação ou modelo que o agente tem do seu *umwelt*. Podemos compreender os conjuntos de focos de excitação que “lutam” para se regenerar neste regime (onde os conjuntos mais fortemente interligados têm mais chances de entrar em atividade), como aquela “idéia vaga” ou ícone puro referido na Seção 2.5.2, quando apresentamos o exemplo que Peirce dá do surgimento de uma nova idéia. Este processo ocorre fora do controle do agente, ou seja, não é um processo dirigido pelo centro emocional, que está “satisfeito” com os sinais enviados pelo hemisfério no regime de sono, nem pelo ambiente, que não está acessível devido às conexões inibitórias dos receptores com os neurônios ativos do hemisfério no regime de sono.

Já os raciocínios dedutivos e indutivos ocorrem principalmente nos ciclos de indentação, durante o regime de vigília (Seção 5.4.1). No início de um ciclo de indentação, diversos focos de excitação disputam o direito de permanecer no “desejo final” do agente, e aqueles que o conseguem são regenerados e têm suas interconexões reforçadas, pois estão ativos simultaneamente. Toda vez que um grupo neural consegue entrar em atividade, ele auxilia outros a também entrarem em atividade (notadamente aqueles que estiverem de alguma forma relacionados com ele), e assim as conexões entre estes grupos são fortalecidas. Podemos entender isto como o processo de explicação de hipóteses efetuado pela dedução: um grupo neural formado por um raciocínio abdutivo, quando entra em atividade durante a indentação, associa-se a novos conceitos, caracterizando um raciocínio dedutivo.

Enquanto o raciocínio abdutivo é responsável por criar novas hipóteses e o raciocínio dedutivo é responsável por explicá-las, o raciocínio indutivo desempenha o papel de testar as hipóteses, e expandi-las ou modificá-las levemente se necessário (Seção 2.6). No agente neuroenergético o teste das hipóteses é feito ao final do ciclo de indentação, quando é verificada a correspondência do desejo do agente com o ambiente. Um grupo neural formado durante o regime de subconsciência, e correspondendo a uma nova hipótese, conseguirá entrar em atividade e perpetuar-se somente se corresponder à realidade do ambiente. Quanto mais vezes esta correspondência for verificada, mais serão reforçadas as conexões internas e externas dos grupos envolvidos. A atividade repetida e simultânea de vários grupos também pode dar origem a novos grupos neurais, que são generalizações daqueles, o que caracteriza uma expansão de conhecimento, e também é um raciocínio indutivo. Por outro lado, o agente está sujeito à falha indutiva, ou seja, pode acontecer de um grupo mostrar-se sem correspondência real, o que terá como consequência uma diminuição na saúde do agente e a não regeneração dos neurônios do grupo, implicando numa redução gradativa das conexões até que o grupo deixe de existir como tal.

6.4 Resumo

Neste capítulo analisamos o neurônio, a rede, e o agente neuroenergético do ponto de vista da semiótica e da inteligência artificial, e os principais aspectos desta análise são:

- O neurônio neuroenergético difere dos outros modelos de neurônio artificial especialmente por sua capacidade de auto-controle, visando a minimização do consumo.
- A rede neuroenergética não precisa de impulsos ou dados externos para se auto-organizar,

mas utiliza estes apenas como forma de reduzir ainda mais o consumo de energia. O surgimento das funções “inteligentes” é secundário.

- O agente neuroenergético não é dividido em módulos com funções específicas, mas possui vários componentes que operam de maneira coordenada e interdependente. Ele é *contextualizado* no ambiente, cria e utiliza uma representação não-simbólica e dinâmica deste, e possui uma capacidade de aprendizado por reforço auto-controlada e também supervisionada.
- O agente também é capaz de efetuar os três tipos de raciocínio que compõem o processo de investigação científica: abdução – no regime de subconsciência; dedução – na formação do desejo; e indução – na avaliação da indentação e durante a atividade da memória.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

*Valeu a pena? Tudo vale a pena
Se a alma não é pequena.
Quem quer passar além do Bojador
Tem que passar além da dor.*

(“Mar Português” - Fernando Pessoa)

Neste trabalho apresentamos o modelo de um agente inteligente baseado nas redes neurais neuroenergéticas, propostas por Emelyanov-Yaroslavsky (1990). Também apresentamos os resultados obtidos através da implementação e simulação computacional da rede neuroenergética, comprovando sua capacidade de auto-organização em função da resolução do problema de minimização no consumo de energia. Finalmente, analisamos o agente neuroenergético do ponto de vista da inteligência artificial e da semiótica peirceana, identificando as potencialidades e também limitações desta proposta.

Um dos aspectos mais interessantes do trabalho é a definição do que é inteligência a partir do conceito neuroenergético. Do ponto de vista do agente neuroenergético, o guia da semiose é a necessidade de otimizar o consumo de energia. Este é o objetivo interno do agente, sua inteligência. As funções de memória, generalização, classificação do ambiente, atuação, sensoramento, etc., são meios para atingir o objetivo. Isto torna o sistema muito mais plausível do ponto de vista biológico, pois parte do princípio de que, na natureza, o problema de se criar um sistema inteligente nunca foi proposto como tal. Foi resolvido sem ter sido proposto. O problema que estava sendo resolvido (e continua sendo) ao longo do processo evolutivo é o da viabilidade das células e organismos em ambientes dinâmicos, com limitação de energia e outras adversidades. Os caminhos que levam

à satisfação deste objetivo são os mais diversos. Entre eles estamos nós, seres humanos, especiais de certa forma, com grande capacidade cognitiva, mas biologicamente também na luta por sobrevivência. Não só isso, cremos.

O trabalho dá apenas um primeiro passo na trilha (trilha, pois não é caminho aberto) para se construir um agente funcional, que possa ser utilizado, por exemplo, no controle um robô, como o “Nomad” de Edelman (1992). Há certamente muitos problemas a serem resolvidos, alguns de caráter prático, outros de caráter conceitual; poucos visíveis deste ponto do trajeto:

- O ajuste das equações, constantes e restrições que regem o comportamento do neurônio precisa ser automatizado. A grande interdependência entre estes elementos e a grande quantidade de neurônios necessários para a construção do agente praticamente inviabilizam um ajuste manual. A utilização de mecanismos evolutivos para o ajuste parece promissor, mas exige o desenvolvimento de métricas de avaliação. Uma maior flexibilidade poderia ser obtida com a utilização de lógica *fuzzy* na definição das equações/restrições.
- O problema da morte dos neurônios não foi satisfatoriamente resolvido. A solução mais adequada talvez seja a natural: neurônios mortos são eliminados. Mas enquanto a rede ainda não está organizada, muitos neurônios morrem, o que pode inviabilizar a formação da estrutura base se não houver um processo simultâneo de criação de neurônios neste período.
- A visualização do que está ocorrendo na rede e no agente também precisa ser melhorada. Os gráficos apresentados no trabalho auxiliam numa análise pós-operacional, mas faz-se necessária a implementação de mecanismos de controle e visualização dinâmica das variáveis e estados da rede neuroenergética.
- Os neurônios do centro emocional e os neurônios motores possuem algumas características diferentes dos neurônios aqui implementados, características estas que precisam ser melhor especificadas. Além disso, há que se considerar a possibilidade de haver ainda outros tipos de neurônios.
- Para construir o agente é necessário definir os principais grupos primários, que controlam os receptores e atuadores, e também dividir a memória em zonas específicas para cada tipo de grupo primário ou modalidade de impulsos. A definição de como se dará esta divisão passa pela definição da interconexão dos neurônios: com quantos neurônios cada neurônio pode conectar-se? Quais os critérios para a definição das conexões? Também a divisão da massa neural em hemisférios precisa ser especificada.

- A construção do agente precisa ser subdividida em etapas, e deve ocorrer de forma incremental. Mas a forte interconexão e interdependência entre seus componentes dificulta esta tarefa. Por isso os passos precisam ser muito bem planejados e ter objetivos alcançáveis, dado o progresso da implementação de cada etapa. O trabalho de Edelman pode novamente servir de inspiração neste sentido.

Finalmente, algumas palavras sobre um aspecto do agente neuroenergético que praticamente não foi abordado ao longo destas páginas: sua semelhança com o funcionamento do cérebro: divisão em hemisférios, regeneração da memória durante um regime subconsciente, representação dinâmica e distribuída, para citar apenas alguns. Investigar mais a fundo estas semelhanças é de suma importância para o futuro desenvolvimento do agente, tal como é fundamental a análise de uma planta ou modelo para a construção de uma casa. Mas dada a complexidade do modelo em questão, e a quantidade de mistérios não resolvidos que o envolvem, o produto pode acabar trazendo explicações sobre o funcionamento do modelo. Não seria a primeira vez.

Referências Bibliográficas

BROOKS, RODNEY A. 1990. A Robot That Walks: Emergent Behaviors for a Mobile Robot. *In*: P.H.WINSTON (ed), *Artificial Intelligence at MIT*, vol. 2. Cambridge, MA: The MIT Press.

BURCH, ROBERT W. 2001. Charles Sanders Peirce. *In*: ZALTA, EDWARD N. (ed), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/archives/fall2001/entries/peirce/>: Stanford University.

CHANGEUX, JEAN-PIERRE. 1985. *Neuronal Man*. Princeton University Press.

DARPA. 2002 (June). *BAA02-21: Cognitive Information Processing Technology*. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), <http://www.darpa.mil/ipto/Solicitations/BAA02-21>.

EDELMAN, GERALD M. 1987. *Neural Darwinism: The Theory of Neural Group Selection*. New York, NY: Basic Books.

EDELMAN, GERALD M. 1992. *Bright Air, Brilliant Fire: on the Matter of the Mind*. New York, NY: Basic Books.

EMEL'YANOV-YAROSLAVSKY, LEONID B. 1990. *Intelligent quasi-Biological System (Inductive automaton)*. Nauka, Moscow. <http://www.aha.ru/~pvad> (in Russian).

EMEL'YANOV-YAROSLAVSKY, LEONID B. 1992. *Neuroenergetic Concept of Intelligence*. <http://www.aha.ru/~pvad/concept>.

EMEL'YANOV-YAROSLAVSKY, LEONID B. 1996. *Fantasies: Experiments of Reasoning about God and the Man*. Nauka, Moscow. <http://www.aha.ru/~pvad> (in Russian).

EMEL'YANOV-YAROSLAVSKY, LEONID B., & POTAPOV, V. I. 1992a. "Live" neuron and optimal learning rule. *Biological Cybernetics*, **67**(1), 67–72.

- EMEL'YANOV-YAROSLAVSKY, LEONID B., & POTAPOV, V. I. 1992b. Self-organization of day cycle and hierarchical associative memory in "live" neural network. *Biological Cybernetics*, **67**(1), 73–81.
- FANN, K. T. 1970. *Peirces Theory of Abduction*. Martinus Nijhoff, The Hague.
- FRANKLIN, STAN. 1995. *Artificial Minds*. Cambridge, MA: MIT Press.
- GERSTNER, WULFRAM. 2002. *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, ed. M.A. Arbib. 2 edn. Cambridge, MA: The MIT Press. Chap. Integrate-and-Fire Neurons and Networks.
- GOMES, ANTÔNIO SÉRGIO RIBEIRO. 2000 (June). *Contribuições ao Estudo de Redes de Agentes*. M.Phil. thesis, Universidade Estadual de Campinas (FEEC–DCA).
- GUDWIN, RICARDO RIBEIRO. 1996a. *Contribuições ao Estudo Matemático de Sistemas Inteligentes*. Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas (FEEC–DCA).
- GUDWIN, RICARDO RIBEIRO. 1996b. Introdução à Semiótica Computacional. In: *XVII Seminário Nacional dos Estudantes de Engenharia*. Universidade Federal de Goiânia, Goiânia - GO.
- GUDWIN, RICARDO RIBEIRO. 1998 (Sept.). On the Generalized Deduction, Induction and Abduction as the Elementary Reasoning Operators within Computational Semiotics. *Pages 795–800 of: Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems and Semiotics*.
- GUDWIN, RICARDO RIBEIRO. 1999 (Oct.). From Semiotics to Computational Semiotics. In: *Proceedings of the International Congress of the International Association for Semiotic Studies (IASS)*.
- GUDWIN, RICARDO RIBEIRO. 2000 (Oct.). Evaluating Intelligence: A Computational Semiotics Perspective. *Pages 2080–2085 of: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*.
- GUERRERO, JOSÉ A. S. 2000. *Rede de Agentes: Uma Ferramenta para o Projeto de Sistemas Inteligentes*. M.Phil. thesis, Universidade Estadual de Campinas (FEEC–DCA).
- GUYTON, ARTHUR C. 1992. *Basic Neuroscience: Anatomy & Physiology*. 2 edn. W.B. Saunders Company.
- HAYKIN, SIMON. 1994. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. New York, NY: Maxwell Macmillan International.

- Kaelbling, Leslie Pack, Littman, Michael L., & Moore, Andrew W. 1996. Reinforcement Learning: A Survey. *Artificial Intelligence Research*, 4, 237–277.
- Kruse, Felicia E. 1986. Indexicality and the Abductive Link. *Transactions of the Charles S. Peirce Society*, 22(4), 435–447.
- Maass, W. 1996. Networks of Spiking Neurons: The Third Generation of Neural Network Models. *Pages 1–10 of: Bartlett, Peter, Burkitt, Anthony, & Williamson, Robert (eds), Australian Conference on Neural Networks*. Australian National University.
- Maturana, Humberto, & Varela, Francisco J. 1980. *Autopoiesis and Cognition: The Realization of Living*. Reidel Publishing Co.
- Meystel, Alexander M. 1996. Intelligent Systems: A Semiotic Perspective. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 1, 31–57.
- Nöth, Winfried. 1990. *Handbook of Semiotics*. Indianapolis: Indiana University Press.
- Nöth, Winfried. 1998. *Panorama da Semiótica: de Platão a Peirce*. 2 edn. São Paulo, SP: Annablume.
- Peirce, Charles Sanders. 1960. *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*. 2 edn. Harvard University Press. Editado por C. Hartshorne, P. Weiss e A. W. Burks. Aqui referidos como **CP** (os números das citações referem-se respectivamente aos volumes e parágrafos).
- Reeke, George N., & Edelman, Gerald M. 1988. Real Brains and Artificial Intelligence. In: Graubard, S.R. (ed), *The Artificial Intelligence Debate*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Russel, Stuart, & Norwig, Peter. 1995. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Santaella, Lúcia. 1983. *O que é Semiótica*. 1 edn. São Paulo, Brasil: Editora Brasiliense.
- Santaella, Lúcia. 1992. *A Assinatura das Coisas; Peirce e a Literatura*. Rio de Janeiro, Brasil: Imago.
- Santaella, Lúcia. 2000a. *Abduction and the limits of formalization*. www.pucsp.br/~lbraga/abdu2.doc.
- Santaella, Lúcia. 2000b. *The development of Peirce's three types of reasoning: Abduction, Deduction and Induction*. www.pucsp.br/~lbraga/abdu1.doc.

-
- SANTAELLA, LÚCIA. 2000c. *A Teoria Geral dos Signos*. São Paulo, SP, Brasil: Pioneira.
- SHANAHAN, MURRAY. 1997. *Solving the Frame Problem: A Mathematical Investigation of the Common Sense Law of Inertia*. Cambridge, MA: MIT Press.
- SHANAHAN, TIMOTHY. 1986. The First Moment of Scientific Inquiry: C.S.Peirce on the Logic of Abduction. *Transactions of the Charles S. Peirce Society*, **22**(4), 449–466.
- SUÁREZ, LIZET LIÑERO. 2000. *Conhecimento Sensorial - uma Análise segundo a Perspectiva da Semiótica Computacional*. M.Phil. thesis, Universidade Estadual de Campinas (FEEC–DCA).
- VARELA, FRANCISCO J., THOMPSON, E., & ROSH, E. 1991. *The Embodied Mind*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- VARZINCZAK, IVAN JOSÉ. 2002. *Causalidade e Dependência em Raciocínio sobre Ações*. M.Phil. thesis, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- VERSCHURE, PAUL F.M.J. 1993. Formal Minds and Biological Brains. *IEEE Expert*, oct, 66–75.
- VON ZUBEN, FERNANDO JOSÉ. 2001. *Redes Neurais*. Notas do curso IA353 da pós-graduação da FEEC–UNICAMP (<http://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/courses/ia353.html>).
- WALTHER-BENSE, ELISABETH. 2000. *A Teoria Geral dos Signos*. 1 edn. Perspectiva, São Paulo.
- WEISS, GERHARD (ed). 1999. *Multiagent Systems A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. 1 edn. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press.
- WHITAKER, RANDALL. 2001. *Tutorial of the Autopoietic Theory from Maturana and Varela*. <http://www.enolagaia.com/Tutorial1.html>.

Índice Remissivo

Autores

- Brooks (1990) 13
- DARPA (2002) 4
- Edelman (1987).....3, 13, 52, 134
- Edelman (1992).....13, 142
- Emelyanov-Yaroslavsky & Potapov (1992a) 2,
8, 43
- Emelyanov-Yaroslavsky & Potapov (1992b) 2,
43, 85, 109, 136
- Emelyanov-Yaroslavsky (1990) . 2, 4, 43, 101,
115, 141
- Emelyanov-Yaroslavsky (1992) .. 2, 43, 51, 54
- Fann (1970).....39, 40
- Franklin (1995) 3, 12, 14, 136, 137
- Gerstner (2002) 8, 134
- Gomes (2000).....3
- Gudwin (1996a).....3, 17
- Gudwin (1999) 17
- Gudwin (2000) 10, 17, 138
- Guerrero (2000).....3
- Guyton (1992) 64, 65, 67
- Haykin (1994) 7–9, 135
- Kaelbling *et al.* (1996) 137
- Maass (1996) 8
- Maturana & Varela (1980) 3, 11
- Meystel (1996).....17
- Nöth (1990) 12
- Nöth (1998) 33
- Reeke & Edelman (1988) 10
- Russel & Norwig (1995).....9
- Santaella (1983).....18–22
- Santaella (1992).....34, 35
- Santaella (2000a) 41
- Santaella (2000b) 40
- Santaella (2000c).....22, 24–34, 36, 37
- Shanahan (1986).....40
- Shanahan (1997).....5
- Suárez (2000).....3
- Varela *et al.* (1991) 12
- Varzinczak (2002).....5
- Verschure (1993).....2, 5, 13, 136
- Walther-Bense (2000) 20, 21
- Weiss (1999).....9
- Whitaker (2001) 11, 12
- von Zuben (2001) 7

A

- abdução 40, 138
- agente 9
- agente autônomo 9
- agente neuroenergético.....2, **44**, **101**, 135
- ação.....121
- crítica.....123
- não crítica 123
- centro emocional .. *veja* centro emocional
- grau de cautela.....125
- grau de confiança.....124

mecanismo de ação.....	124
mecanismo de proteção.....	125
memória.....	<i>veja</i> memória
objetivo.....	118
realização.....	121
saúde.....	<i>veja</i> centro emocional, saúde
agente racional.....	9
algoritmos.....	86
aprendizado.....	136
argumento.....	38
arquiteturas de agentes	
baseadas em lógica.....	9
BDI.....	10
em camadas.....	10
reativas.....	9
auto-excitação.....	130
autopoiese.....	11
C	
centro emocional.....	51, 54 , 109
estado neutro.....	112
neurônio.....	110
saúde.....	54, 111
ciclo diário.....	50, 79, 82
cognição.....	11, 12
conexões interneuronais.....	73 , 91
excitatórias.....	74, 91
fortes.....	105
fracas.....	105
inibitórias.....	75, 91
conjuntos de classificação.....	14
construtivismo.....	11
contextualização.....	6, 13, 136

D

dedução.....	40, 138
déficit de energia.....	55
degeneração.....	14, 135
dicente.....	38
distribuição dos neurônios.....	112

E

<i>enactive paradigm</i>	12
enquadramento.....	6, 136
excitação externa.....	50, 83 , 98
direta.....	121
indireta.....	121
experiência colateral.....	28

F

facilitação pós-tetânica.....	<i>veja</i> neurônio, facilitação pós-tetânica
fenomenologia.....	20
fluxo ótimo de excitação.....	50, 83 , 120
foco de excitação.....	53, 105, 117
fonemas externos.....	106
<i>frame</i>	6, 136
<i>frame-of-reference</i>	6, 136
fundamento simbólico.....	6, 13, 136

G

GAM.....	50, 78
generalização.....	57, 125
grupos neurais.....	13, 52 , 104
ativos.....	53, 105
descanso.....	53, 105
dominantes.....	54, 118
estado latente.....	105
facilitação pós-tetânica.....	105
primários.....	46, 52, 103 , 135

- tipos 106
- secundários 46, **104**, 107
- semi-ativos 53, 105
- I**
- ícone 37, 138
- indentação 117, 138
- avaliação da solução 122
- formação do objetivo 118
- resolução do problema 120
- índice 38
- indução 40, 139
- instinto 41
- inteligência artificial 5
- inteligência artificial conexcionista 7
- inteligência artificial simbólica 5
- interpretante **32**
- interpretante dinâmico 34
- interpretante final 34
- interpretante imediato 33
- J**
- juízo perceptivo 30, 41
- L**
- legi-signo 36
- lote neural 54, 113
- M**
- mapeamento 14
- mapeamentos globais 14
- memória **102**, 136
- N**
- neurônio neuroenergético . 8, 46, **62**, 110, 134
- consumo de energia **70**, 90
- estado inicial 70
- estado latente 67, 79, 89
- exaltação 64
- facilitação pós-tetânica 67, 89
- grau de degeneração 46, **62**, 88
- impulso 47, **63**
- freqüência máxima 65, 88
- freqüência mínima 65, 88
- freqüência ótima 66, 88
- isolado 63, 66
- limiar estático **67**, 89
- limiar puro **68**, 90
- potencial de entrada 74
- potencial resultante **67**, 91
- refração absoluta 64
- refração relativa 64
- regeneração 47, **63**
- região crítica 71
- reserva de energia 47, **70**
- saúde 47, **76**
- notação xx
- O**
- objeto **27**
- objeto dinâmico 28
- objeto imediato 28
- ontologia 6, 136
- P**
- paradigma promulgador 12
- percepção **29**
- percepto 29
- perceptron* 8
- percipuum* 30
- plugues 104
- primeiridade 21, 26

propriedade da alternatividade...76, 78, 103,
105, 107

Q

quali-signo..... 36

R

receptores **103**, 120

rede de Kohonen..... 9, 134

rede neuroenergética 9, 49, **77**, 134

 consumo de energia..... 82

 estado inicial..... **77**

 estrutura base..... 49, **77**

redes neurais artificiais..... 7

reentrância 14, 135

rema 38

repertório primário..... 13, 52, 135

repertório secundário 13, 135

representâmen 25

S

secundidade 21

seleção de grupos neurais 13, 135

semiose ilimitada 23

signo **24**

signo degenerado 25

símbolo..... 38

sinal..... 54, 113

sin-signo..... 36

sistema cognitivo 3

sistema de valores 136

sistemas inteligentes gerais..... 1

situatedness 6, 13, 136

sono..... 50, **79**

spiking neuron 8, 134

subconsciência 57, 108, 126, 138

symbol-grounding 6, 13, 136

T

terceiridade..... 21

tônus emocional..... 56, 111, 123

U

umwelt 12, 135

V

vigília 50, **80**

visão de referência 6, 136

vocabulário ativo 57, 126

vocabulário de nomes 58, 130

vocabulário passivo 57, 126

 regeneração..... 57, 125

Z

zonas da memória 106