

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

0396395
Nov 162
Dira 3394

ESTUDOS COM O MODELO DO TRION
DE PROCESSAMENTO CORTICAL DE INFORMACAO

TADEU MELLO E SOUZA

Orientador

Prof. JORGE ALBERTO QUILLFELDT

Dissertacao apresentada ao Departamento de Biofisica do
Instituto de Biociencias para a obtencao do titulo de
Bacharel em Ciencias Biologicas - Enfase em Biofisica.

Junho 1994

AGRADECIMENTOS

AO DESTINO, por me trazer a Porto Alegre, terra tao distante, e nela realizar um sonho.

'A SORTE...

de ter o Prof. Jorge Quillfeldt como orientador (GURU!), colega e AMIGO, ao longo da execucao deste trabalho de bacharelado.

do carinho e estimulo da Prof. Elisabete (Beti) em minhas primeiras caminhadas junto 'a pesquisa cientifica.

da amizade e coleguismo dos integrantes dos grupos de Neurofarmacologia da Memoria e de Fosforilacao de Proteinas Cerebrais, do Departamento de Bioquimica, em especial Carla, Rafael, Bia, Marcia, Giovana, Alex, Nice, Lucia, Carmen e Carlos Alberto (CA).

AOS DEPARTAMENTOS ...

de Biofisica, pela oportunidade de realizacao deste trabalho e pelo apoio de seus professores (em especial, Evaldo, Hampe e, e' claro, Jorge).

de Bioquimica, pela receptividade e o apoio material, sem os quais este trabalho dificilmente se realizaria.

e ao Centro de Supercomputacao desta Universidade, pelo auxilio tecnico e material 'a realizacao das simulacoes.

'AS INTITUICOES...

pela universidade publica e gratuita.

pelo apoio da FAPERGS, por suas bolsas concedidas.

A OPORTUNIDADE...

de encontrar George e Neto, amigos sinceros e eternos, cujos ideais nortearam minha determinação de seguir sempre adiante.

AO AMOR...

da família VENCATO (Adão, Celívia, Jamile e Magali), pela confiança, acolhimento e proteção nos momentos mais difíceis.

da família BECKER (Elgar, Lorena, Eduardo, Virginia, Marta e Rodolfo), pelos grandes momentos de alegria.

de meus pais e irmão, que sempre acreditaram, que sempre tem saudade, e que sempre comigo estarão presentes.

RESUMO

Varios autores apontam a importancia da organizacao cortical dos neuronios em minicolunas, as quais seriam a base funcional do processamento de informacao do Sistema Nervoso Central (SNC) de mamiferos. Shaw e colaboradores (1985) propuseram um modelo matematico de Rede Neural em que a conectividade estruturada entre estas minicolunas e' responsavel por sua riqueza de comportamento. As unidades de processamento da rede nao sao neuronios, mas agrupamentos dos mesmos (as "Minicolunas"), funcionalmente indivisiveis, que, de acordo com o grau de atividade da populacao de seus neuronios (que so' assumem dois estados), admitem tres estados possiveis (dai', "Trion"). O modelo do Trion comporta ainda o conceito de "Temperatura", que representa o nivel de liberacao espontanea de neurotransmissores nas sinapses do SNC, fenomeno descrito por Katz (1963), e, que, acreditamos, teria uma funcao moduladora essencial, nao sendo um mero acidente. Varios Trions (minicolunas) se conectam de forma estruturada formando uma rede, que e' a "coluna". De acordo com a temperatura e as conexoes dadas, a rede evolui ate' certos padroes espaco-temporais (MPs) caracteristicos. Esta rede tem um Repertorio fixo de MPs possiveis em uma dada faixa de temperatura, sendo que a incidencia destes MPs pode ser modificada variando-se os parametros da rede (Selecionismo de Edelman). Em nossas simulacoes computacionais, verificamos a variacao de incidencia dos MPs, ou ate' a mudanca destes MPs, em funcao da temperatura e das conexoes. Verificamos ainda a variacao de outras caracteristicas do Repertorio destas redes, como o seu tempo de processamento, em funcao dos mesmos parametros.

I N D I C E

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - O Estudo Científico da Mente Humana.....	1
1.2 - Cerebro, Evolução e Ontogenia.....	2
1.3 - Os Modelos Conexionalistas.....	4
1.4 - Os Modelos Conexionalistas da Física.....	9
1.5 - O modelo do Trion.....	12
1.6 - Descrição do Modelo do Trion.....	17
2. OBJETIVOS.....	30
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4. RESULTADOS.....	42
4.1 - Efeitos da temperatura (em redes de NPS=2).....	42
4.1.1 - Sobre as Probabilidades de Ciclagem.....	42
4.1.2 - Sobre o Número de Zeros.....	44
4.1.3 - Sobre o Número de MPs (riqueza do Repertório).....	46
4.1.4 - Sobre a 'Energia' Média dos MPs.....	46
4.2. Efeito de variações nos valores das Conexões... ..	51
4.2.1 - Quanto à Simetria (NPS = 2).....	51
4.2.2 - Em Redes de NPS = 1 (com apenas 1 passo de tempo).....	55
4.3 - 'Energia' Média, Número de Ocorrências e PCs... ..	58
4.4 - Estudo das variações nos Limitares.....	58

5. DISCUSSÃO.....	59
6. CONCLUSÕES.....	72
6.1 - Efeitos da variação da temperatura.....	72
6.2 - Efeito da variação nos valores das Conexões...	72
6.3 - Efeitos sobre a 'Energia' média dos MPs.....	73
7 - BIBLIOGRAFIA.....	74

1. INTRODUCAO

1.1 - O Estudo Cientifico da Mente Humana

Sao muitos os mistérios que fascinam, ou mesmo, angustiam o espirito humano desde seus primordios. Intuitivamente, e com grande admiracao, percebemos a fulgurosa existencia de vida em nosso planeta, e nos deslumbramos com sua beleza e complexidade.

E' voltando-se para si mesmo, porem, que o espirito humano, na percepcao de sua propria existencia, desvia a atencao ao objeto de sua maior contemplacao e questionamento: a mente humana.

Nao devemos, porem, considerar a mente humana como algo intrinsecamente incompreensivel, mas trata-la como um objeto passivel de analise cientifica, que possa ser entendido atraves de uma teoria cientifica. Para tanto, nao podemos esquecer ~~que~~ que as proposicoes verdadeiramente cientificas devem ser testaveis experimentalmente.

Assumindo, entao, a postura de procurar ~~o~~ o entendimento previo das questoes mais simples, caso nos deparemos com um problema demasiadamente complexo ^{para} ser respondido com facilidade (o que, sem duvida, se aplica ao caso da mente humana), evitaremos a sujeicao de nosso conhecimento ao deslumbramento mistico e inerme

que advem da apreciação desse tipo de problema. Isto é expressão do postulado reducionista, fundamental na ciência moderna.

Em nosso trabalho, todavia, não estudamos a "mente humana" como tal, diretamente, mas, sim, um modelo útil à compreensão de um domínio restrito da realidade biológica: as consequências da organização funcional estruturada do cortex dos mamíferos. Esta contribuição talvez seja (~~talvez~~^{DU} não) mais um degrau na investigação do fenômeno maior, ainda muito complexo para ser abordado diretamente.

1.2 - Cerebro, Evolução e Ontogenia

Segundo Cloninger (1987), as espécies não evoluem ao longo do tempo com vistas à elaboração de estruturas de máxima funcionalidade, em um contexto "finalista". Evoluem, sim, no imediatismo da construção (em muitos casos, da destruição) de estruturas que promovem uma maior adaptabilidade de seus portadores ao meio.

Sob este ponto de vista, podemos observar o crescente aperfeiçoamento da coordenação nervosa ao longo da história evolutiva dos metazoários, em particular, na evolução dos mamíferos.

A evolução de nossos cérebros se desenrolou, em parte, com a

adicao de novas estruturas 'as ja' previamente existentes. E, dentre todas estas novas estruturas, destaca-se o ~~o~~ neocortex dos mamiferos. A preservacao funcional das estruturas mais antigas permitiu, entao, o trabalho continuo do sistema, alem de ter se revelado bastante adaptativa; sua arquitetura atual, porem, nao deve ser necessariamente a mais eficaz, embora se mostre maravilhosamente complexa.

O material genetico contido nas celulas de um individuo, preservado ao longo do processo evolutivo, determina, em boa parte o desenvolvimento ontogenetico de seu sistema nervoso. O resultado final, porem, faz-se diante da interacao de seus genes com os fatores ambientais (alem dos chamados fatores "epigeneticos", como hormônios do desenvolvimento, fatores troficos, microambientes bioquimicos, etc).

A criacao de um excesso de elementos consiste de tatica biologica eficaz a elaboracao de estruturas funcionalmente complexas e que, de inicio, tenham grande potencial adaptativo. Apos a geracao deste excesso, segue-se um processo de refinamento seletivo, que diminui o potencial funcional da estrutura, tornando-a, porem, mais especializada na realizacao de suas funcoes. A ontogenia de nosso Sistema Nervoso Central (SNC) segue basicamente a estrategia acima, conforme Arenander e de Vellis (Siegel et al., 1989, 4a. Ed., Cap.25). O processo de refinamento seletivo ocorreria, na ontogenia do SNC, atraves da preservacao exclusiva das sinapses funcionalmente significativas, diante de processos plasticos de mudanca de peso dessas sinapses, ou mesmo a morte neuronal. Vol-

taremos a este assunto quando falamos no Selecionismo de Edelman.

1.3 - Os Modelos Conexionistas

Embora o homem desde seus primórdios se questione sobre a relação mente-corpo, apenas mais recentemente (sec. XVII) surge o Método Científico como ferramenta racional de investigação. Este se inspira no exercício voluntário e metódico da dúvida.

A atual concepção do SNC (que envolve os conceitos de conexãoismo e processamento em paralelo) é consequência do desenvolvimento, nos séculos XIX e XX, de áreas como a Neuroanatomia, Neurofisiologia, Neurofarmacologia e Neuropsicologia. Uma das atuais preocupações das Neurociências tem sido a de satisfazer a crescente necessidade de refinar o entendimento do tipo de processamento informacional realizado pelo SNC. Conforme Crick (1979), "não é verdade que a maioria dos neurobiologistas não tem uma concepção geral do que acontece. O problema é que tal concepção não está precisamente formulada".

Por outro lado, encontramos nas Ciências da Computação uma crescente procura de novos recursos computacionais, ou mesmo na melhoria dos já disponíveis. Dentre elas, desponta a concepção conexionista que defende as vantagens de modelos com alta conectividade e processamento paralelo na resolução mais eficaz de proble-

mas complexos. Como exemplos, podemos mencionar problemas de otimizacao combinatoria, como o classico problema do caixeiro-viajante (qual a mais curta trajetoria entre as cidades a seguir?), ou a identificacao de rostos. Nestes modelos, a ← informacao deve ser processada por "neuronios formais" (em analogia a realidade biologica), unidades simples que recebem muitas aferencias e emitem apenas uma eferencia.

Observa-se, entao, a convergencia de abordagens das Neurociencias, na busca de um formalismo matematico para melhor substanciar seu corpo teorico, e das Ciencias da Computacao, que busca maquinas capazes de executar tarefas muito complexas.

Em uma rede de neuronios formais, o conjunto dos estados de ativacao de todos os seus neuronios, em um dado momento, constitui, por definicao, o seu Padrao de Atividade. A estrutura logica de um neuronio formal (e de uma rede neural) segue o plano basico de seu analogo biologico:

- os neuronios se interconectam atraves de conexoes ou "sinapses", de diferentes pesos ou eficacias. Podem ser excitatorias (positivas) ou inibitorias (negativas);

- cada neuronio desempenha uma resposta ou saida como consequencia de seu estado de ativacao, determinada por alguma regra de saida. As regras de saida podem ser descontínuas, como em neuronios de tudo ou nada, ou contínuas, como em neuronios analogicos;

- os estímulos aferentes a um determinado neurônio constituem-se no conjunto das respostas ou saídas que lhe ~~sejam~~^{são} dirigidas através de "axônios" provindos de muitos outros neurônios. O conjunto destes estímulos é denominado Campo Local.

O estado de ativação de cada neurônio é, então, determinado pelo computo geral de seus estímulos aferentes, através de uma soma destes. Corresponderia, por analogia, a soma de todas as pequenas despolarizações em cada sinapse sobre o corpo de um neurônio, permitindo (ou não) que se atinja o limiar de despolarização completa da célula.

O grande desenvolvimento dos modelos conexionistas se fez com os chamados "algoritmos de recirculação" (North, 1987). Nestas redes, as unidades de entrada recebem aferências dos neurônios de processamento, em um mecanismo de retroalimentação. Com a recirculação da informação, as redes evoluem em padrões de atividade. Como consequência, atingem certos padrões de atividade, ditos de "energia mínima", que, ao ocorrerem, tendem a se repetir por si mesmos. Estes padrões especiais recebem a denominação de "atratores"; a ~~saída~~ ^{que} de estados os quais uma rede evolui, até o encontro a um atrator, denomina-se "Bacia de Atração".

Um bom exemplo de algoritmo de recirculação em processos biológicos seria o Sistema Auditivo Eferente (Medina, em Cap. 8 de Cingolani, 1989) ^{que} proporciona maior discriminação de sons na presença de ruídos de fundo. A disposição dos neurônios em diferentes camadas, ou "estacões de processamento", é característica de

redes onde a informacao recircula. Isto tambem lembra a organiza-cao do sistema nervoso visual, em diferentes "estacoes neurais" - retina, nucleos geniculados laterais e areas 17,18 e 19 do cortex cerebral.

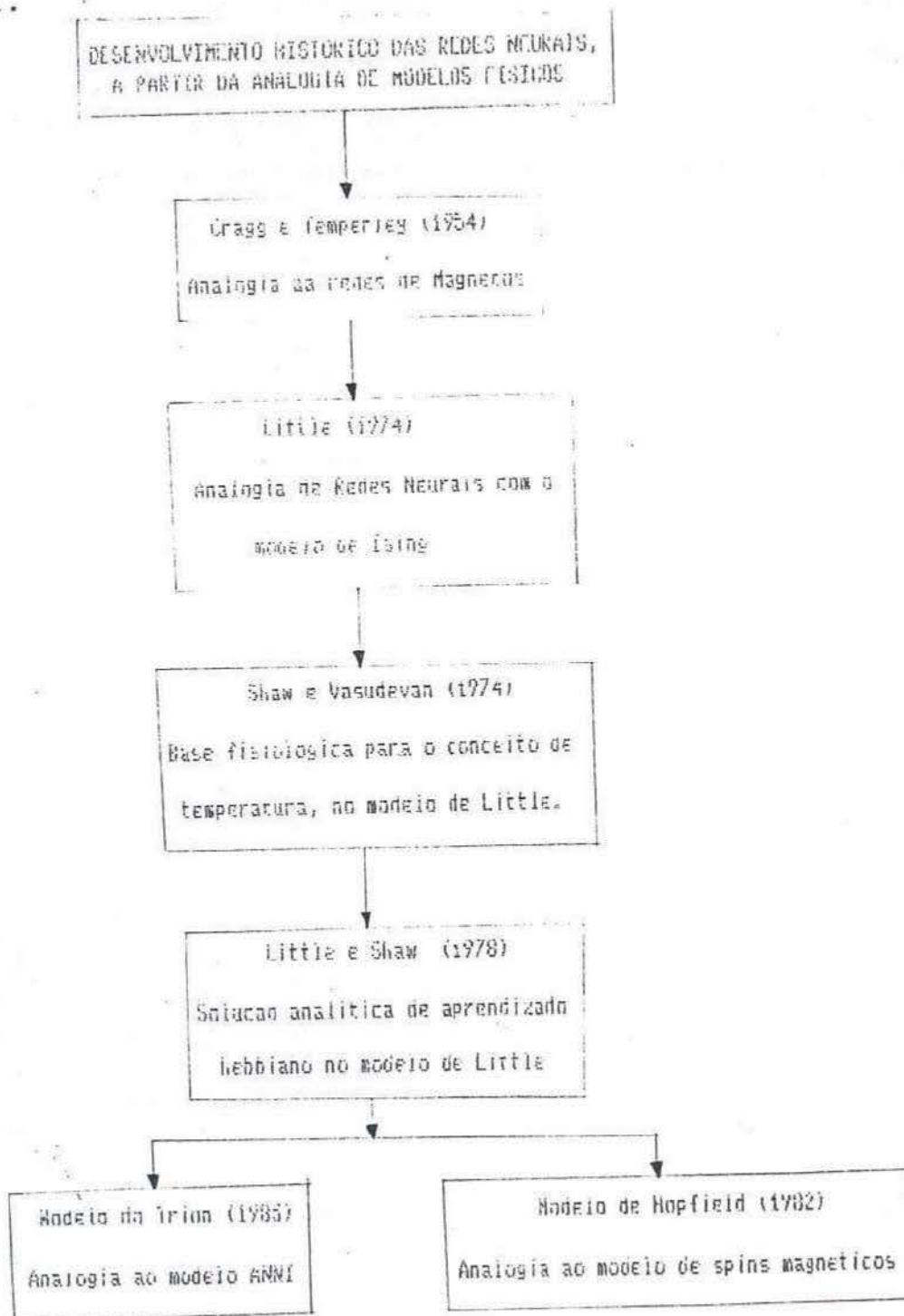


Fig. 1 - Desenvolvimento historico dos modelos conexinistas, segundo analogias com modelos que descrevem sistemas magneticos, na Fisica (Shaw et al., 1988).

1.4 - Os Modelos Conexionistas da Fisica

DELO
NO
NOS-
NUNTE,
EDONADO

A contribuicao da Fisica do Estado Solido, especialmente dos modelos mecanico-estatisticos de sistemas magneticos desordenados, como os sistemas de Ising e os Vidros de Spin, e' de crescente importancia no desenvolvimento teorico dos modelos conexionistas (ver esquema da figura 1).

Cragg e Temperley (1954) trouxeram da Fisica a nocao de cooperatividade entre grupos de atomos na geracao do magnetismo, alem da ideia do papel da temperatura T e da Energia de Interacao E na distribuicao de probabilidades de Boltzmann (proporcional a $\exp[-E/kT]$) determinando o estado do material. Sugeriram, entao, a analogia deste fenomeno com as dinamicas interacoes que ocorrem entre os neuronios numa rede conexionista, onde uma expressao semelhante 'a de Boltzmann determinaria a evolucao de estados da rede. Nao tinham, porem, os analogos biologicos 'a energia e 'a temperatura, nem desenvolveram matematicamente suas ideias. Independentemente destes autores, Little, em 1974, formulou um modelo de rede neural baseado no modelo de Ising de spins magneticos, onde E e T apareciam explicitamente, embora apenas E recebesse interpretacao plausivel.

Nestes sistemas magneticos desordenados, as conformacoes de menor conteudo energetico, logo, de maior probabilidade de ocorrencia (alem de maior estabilidade), sao aquelas nas quais ocorre o maior numero de coincidencias de magnetos alinhados no mesmo

sentido (interações ferromagnéticas), e magnetos alinhados em sentidos opostos (interações antiferromagnéticas).

Conforme apontado por Stein (1989), a presença de várias conformações metaestáveis em uma rede de magnetos, deve-se ao fato de seus elementos poderem constituir agrupamentos, cujas interações internas sobrepõem os efeitos de outros magnetos fora do agrupamento. Como consequência, é possível a ocorrência de dipolos magnéticos alinhados em sentidos opostos, mas que interajam ferromagneticamente, ou que estejam alinhados no mesmo sentido, mas interajam antiferromagneticamente: este fenômeno é denominado de "Frustração". Assim sendo, não são mínimos "absolutos" de energia que estão associadas a estas conformações metaestáveis, mas, sim, mínimos "relativos", intermediários.

Vários autores (Amit, 1990 ; Stein, 1989; Kirckpatrick, 1983) propoem que os problemas de otimização combinatoria poderiam ser resolvidos através desta analogia, pois a cada opção do problema estaria associado um determinado padrão de atividade da rede, e, a cada padrão, um valor energético. O sistema, simulado, cairia naturalmente em alguma dessas soluções.

Observa-se, porém, que devido à presença do fenômeno de frustração e a consequente ocorrência de vários atratores, não necessariamente será atingida a melhor solução. A otimização do tempo de processamento é atingida, assim, pelo encurtamento da distância energética entre a resposta desejada e a resposta tomada como "ideal" (correspondente ao padrão de menor energia). Tal otimização é de vital importância. Como exemplo, no âmbito biológico,

podemos mencionar a adaptabilidade de uma especie no processo de selecao natural.

Em 1974, Shaw e Vasudevan (em Shaw et al., 1988) propuseram que a base fisiologica para o conceito de temperatura no modelo de Little (1974), esta associada as flutuacoes estatisticas na transmissao sinaptica, fenomeno descoberto por Katz (1969): o numero de vesiculas sinapticas liberadas, por impulso nervoso, segue a distribuicao de Poisson, enquanto que a quantidade de neurotransmissores, em cada vesicula sinaptica, obedece a uma curva de distribuicao Normal. Katz tambem demonstrou a existencia de liberacao espontanea de vesiculas com neurotransmissores, tambem seguindo uma distribuicao de Poisson, na ausencia de um potencial de acao.

A presenca de flutuacoes estatisticas na transmissao do sinal em uma rede, seja ela biologica, um modelo matematico, ou um circuito eletrico, tem grande repercussao na evolucao de seus estados. A figura 2 (Amit, 1990) mostra uma representacao grafica da probabilidade de um neuronio binario estar ativado, segundo diferentes campos locais e temperaturas. Aa medida que os valores de B tendem ao infinito (temperaturas tendem a zero), a rede comporta-se de forma mais deterministica, sendo que a representacao sigmoidal se aproxima, em aspecto, de duas semi-retas. Observa-se que ^{Fq. DEGRAU} nao necessariamente um neuronio se ativara', pela presenca de um campo local positivo (ou se apresentara' inativado, com campo local negativo), proporcionando a rede um relativo carater de indeterminabilidade: um mesmo estado inicial, entao, pode conduzir

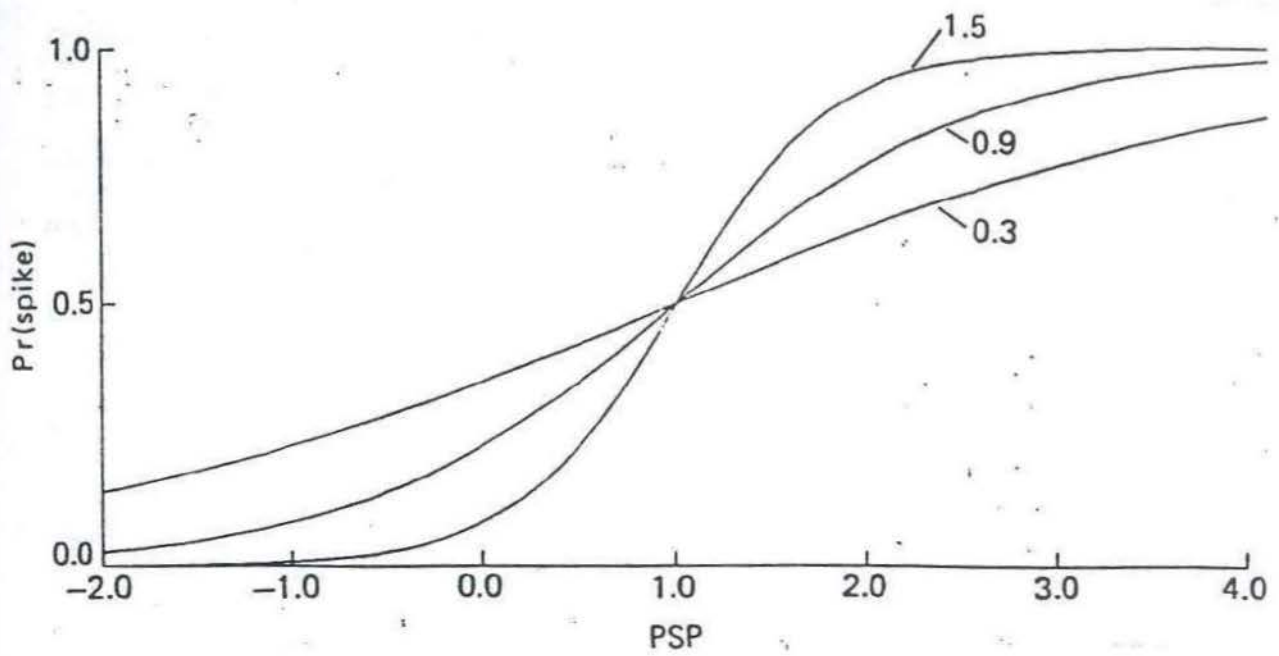


Fig. 2 - Probabilidade do estado ativado de um neurônio, segundo o seu Campo Local, em diferentes valores de B ($1/T$) (extraído de Amit, 1996).

a mais de um atrator. A temperatura de uma rede atua contrariamente a permanencia do estado de um sistema em um determinado atrator.

Em 1985, Shaw propos o Modelo do Trion, baseado em um modelo de spins magneticos com interacoes altamente estruturadas (modelo ANNNI), e com atualizacao em paralelo dos estados. O Modelo do Trion contrasta com outros modelos connexionistas (Hopfield, 1982; Amit et al.; 1985), cujas interacoes nao sao estruturadas e cuja atualizacao dos estados e' serial. Esta "divergencia" em relacao aos demais modelos traduz principalmente diferencas de objetivo: os modelos da escola de Hopfield adotam uma abordagem mais simplista, menos "biologica", pois visam desenvolver novos algoritmos computacionais, ao contrario do modelo de Shaw, que tenta abordar a relacao estrutura-funcao no cortex de mamiferos empregando uma ferramenta matematico-conceitual.

1.5 - O Modelo do Trion

O Principio da Organizacao Colunar de Mountcastle (1978) propoe que a unidade de processamento cortical nao seria mais o neuronio, mas, sim, agrupamentos de neuronios altamente conectados entre si, exibindo propriedades coletivas notaveis. Estas unidades sao denominadas de "Minicolunas", tendo aproximadamente 100 micra de diametro e com cerca de 100 neuronios constituintes.

As minicolunas, por sua vez, conectam-se entre si de forma a constituir as redes fundamentais do processamento cortical, as "Colunas" (de 700 micra de diametro). Assim, de acordo com as conexoes entre cada uma de suas minicolunas e os seus estados iniciais, estas colunas/redes evoluem ate' algum padrao espaco-temporal de atividade (Shaw et al., 1988), que corresponderia aos atratores das redes neurais (doravante nos referiremos a estas "colunas" apenas como "redes").

Embora as interacoes neuronais dentro de uma minicoluna sejam consideradas como de natureza randomica, acredita-se que as mesmas acabariam por determinar um preciso comportamento do conjunto, a uma escala de tempo maior que a de um potencial de acao : de 25 a 100 milissegundos. Wilson e Cowan (1972) exemplificaram esse efeito coletivo de forma muito didatica, com o caso do fluxo de um fluido: embora a nivel molecular o comportamento do sistema apresente-se altamente desorganizado, observa-se a nivel macroscopico um comportamento medio dirigido.

Para Shaw et al. (1988), diversas colunas, de mesmas ou diferentes areas corticais, interagiriam, de modo a proporcionar ao processamento da informacao um nivel superior de organizacao. Funcoes cerebrais muitissimo complexas, que necessitem da utilizacao de diversas funcoes mais simples, seriam desta forma realizadas. Uma provavel consequencia seria o aumento da escala de tempo de realizacao da funcao, a medida que esta necessitasse de niveis superiores de organizacao (conforme ilustra a fig. 3). A mudanca

de escala de organização e integração funcional dos sistemas neurais
 por meio de escalas espaciais e temporais.

UNIDADE	NÚMERO	ESCALA ESPACIAL	ESCALA TEMPORAL
sinapse	10 x 14	1 micron	1 ms
neurônio	10 x 10	20 micra	1 ms
minicolumna	10 x 100	100 micra	25 ms
coluna	10 x 100	700 micra	250 ms
área	100	3 cm	x 2 s
sistema	10	10 cm	x 20 s
CÓRTEX	1	30 cm	x 200 s

Fig. 3 - Escalas tempo-espaciais dos níveis de organização do processamento cortical (Leng, 1992).

de escala de neuronios a minicolunas poderia mostrar-se benefica por duas consideracoes:

- as unidades basicas do processamento da informacao nao estariam limitadas a possuir apenas dois niveis de atividade;

- mecanismos intrinsecos a uma minicoluna poderiam amenizar a grande flutuacao inerente a atividade de um neuronio individual, tanto no que concerne ao intervalo de duracao de um potencial de acao, como no que concerne a precisao de sua resposta a um determinado estimulo.

Como forte evidencia a esta ultima consideracao, pode-se exemplificar o fato de diversos profissionais da musica, tais como um maestro, um solista ou diversos estudantes, poderem executar diversas pecas musicais com fidelidade superior a 99% (Leng et al., 1992). Isto ocorre mesmo com nossos neuronios corticais tendo o intervalo de seus potenciais de acao (de dois milissegundos) variando com desvio padrao de ate' 10% em relacao a media.

Padroes espaco-temporais complexos e periodicos de atividade seriam exclusivos de redes (coluna formada por minicolunas) nas quais as unidades de processamento, as minicolunas, evoluam de forma sincrona (paralela) (Shaw et al., 1988). Assim, todas as unidades se atualizariam em uma determinada cadencia, com um passo de tempo determinado. Este intervalo corresponderia ao tempo no qual as interacoes neuronais definiriam suas minicolunas como unidades funcionais indivisiveis. Esta nocao se mostra em franca

oposição aos modelos onde os neurônios tenham atividade assíncrona (serial e não correlacionada), cujas informações estejam contidas apenas na frequência dos potenciais de ação de seus neurônios. Como modelo de utilidade biológica, exige um menor esforço metabólico de seus neurônios, pois não precisam estar em grande atividade o tempo todo. Isto parece estar de acordo com alguns registros eletrofisiológicos que mostram ser muito baixa a média da frequência de impulsos nervosos dos neurônios no SNC (Tolouse, 1989).

Existem alguns momentos nos quais o processamento neural deve ocorrer mais rapidamente, permitindo, por exemplo, uma resposta motora rápida, típica de situações de perigo. Nestes casos, a sofisticação neural acima descrita não parece intervir (nem seria conveniente), ficando a resposta neural por conta de circuitos mais rápidos e estereotipados. Porém, existem situações em que a sofisticação do problema, como a apreciação de uma sinfonia de Mozart ou no estudo de um modelo matemático, provavelmente devam requerir a evolução precisa de padrões espaço-temporais envolvendo bilhões de neurônios, em uma escala de tempo de, no mínimo, algumas dezenas de segundos.

Uma série de experimentos e estudos, tanto a nível histológico, como fisiológico, evidenciam o Princípio de Mountcastle.

Hubel e Wiesel (em Leng et al., 1992), em estudos em córtex visual de gatos, demonstraram a relação existente entre a atividade de agrupamentos neuronais com a orientação de linhas que sejam apresentadas ao campo visual destes animais. Cada agrupa-

mento respondia, preferencialmente, a uma determinada orientacao, de forma que sua resposta diminuia a medida que a orientacao da linha se afastava da ideal.

Bonhoeffer e Grinvald (em Leng et al., 1992) demonstraram, em estudos em cortex de gatos (area 18), a presenca de minicolunas arranjadas espacialmente de forma bem precisa. Estas minicolunas tinham a caracteristica de responderem preferencialmente a mesma orientacao.

Evidencias positivas do alto grau de redundancia local em populacoes neuronais, incluem aquelas que mostram situacoes em que muitos diferentes neuronios, dentro de um pequeno volume de cortex, desenvolveram respostas praticamente identicas aos mesmos estímulos externos.

A necessidade de um numero minimo de aproximadamente cinquenta neuronios, para que estes passem a atuar de uma forma cooperativa, como uma unidade funcional, foi levantada por estudos anteriores do proprio Shaw (1982).

Sao varias as evidencias histologicas do Principio de Mountcastle: pela fig. 4 (de Killackey, mostrada em Leng et al., 1992), observa-se a existencia de agrupamentos de botoes axonais confinados a regioes de cerca de 100 micra. Recentemente, foi demonstrada (Gilberto e Wiesel, 1991; Hirsh e Gilberto, 1991 - todos em Leng et al., 1992) a presenca de axonios laterais de grande alcance - ate 8 mm - em cortex visual primario, conectando neuronios de minico-

lunas que respondem preferencialmente a mesma orientacao.

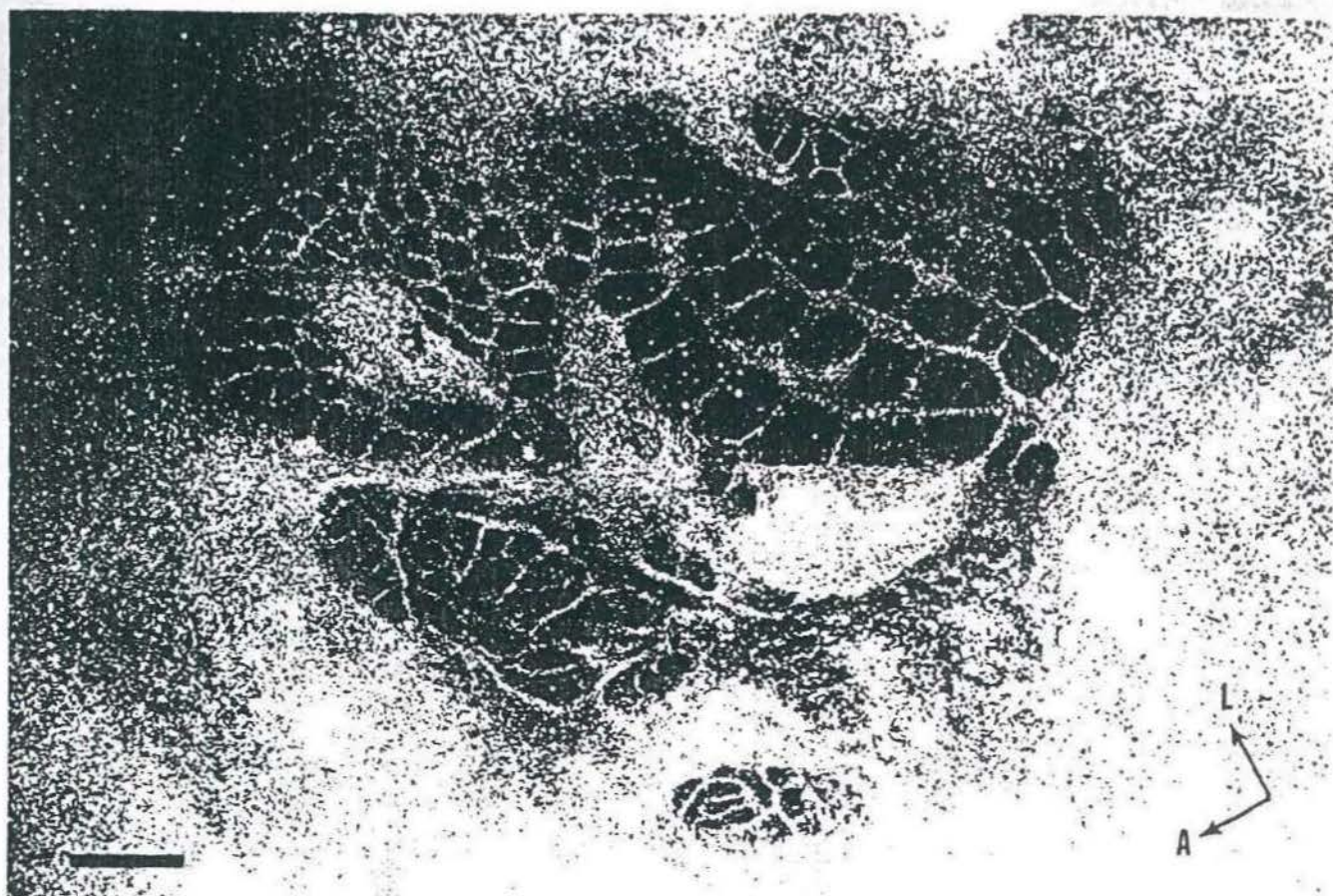


Fig. 4 -- Fotomicrografia de uma seccao da camada IV do cortex somatosensorial de rato (espalhada em um plano), impregnada pelo metodo da succinato desidrogenase. As manchas escuras sao areas de densa projecao talamica, enquanto que as areas claras intermediarias sao projecoes calosas. Aqui esta' representado o corpo inteiro do rato. A barra de escala representa 500 micra, portanto, as manchas escuras tem uma escala espacial de cerca de 100 micra. Tais observacoes histoquimicas sao facilmente reproduziveis de rato para rato (De Killackey e Dawson, reproduzido em Leng et al., 1992).

1.6 - Descrição do Modelo do Trion

Pelo Modelo do Trion, as minicolunas, podem apresentar tres estados possiveis de atividade, representando tres diferentes niveis de atividade media de seus neuronios constituintes: baixa, intermediaria e alta atividade. Por esta razao, tais minicolunas sao denominadas de "Trions". A simplificacao em tres niveis de atividade permite tanto uma melhor visualizacao dos dados, como uma maior velocidade no desenvolvimento de cada simulacao.

O Estado de uma rede e' definido como a combinacao dos estados de atividade de cada um de seus Trions, em um determinado momento. Como cada Trion pode possuir tres estados de atividade, o numero de combinacoes possiveis de estados de uma rede de NA trions equivale a tres elevado a este numero (3^{NA}). Como Shaw se baseia no modelo ANNNI de sistema de Spins, onde ficaram demonstradas as vantagens de se utilizar dois passos de tempo, considera-se um "estado inicial" a configuracao dos NA trions nos dois passos de tempo iniciais; assim, o numero total de estados iniciais e' dado por $3^{(2*NA)}$. Por exemplo, uma rede de 4 trions tem um numero total de estados iniciais $3^{(2*4)} = 3^8 = 6561$.

Nas simulacoes realizadas pelo grupo do Dr. Shaw, o uso de dois passos de tempo (NPS = 2) para os calculos tem mais uma razao: adota-se como premissa, com um certo fundamento empirico, que o efeito de um potencial inibitorio pos-sinaptico (PIPS) e' mais duradouro do que o efeito de um potencial excitatorio pos-

sinaptico (PEPS). Dai, se ambos forem oriundos de dois passos de tempo anteriores, o inibitorio sendo mais remoto, podem influenciar o calculo de estado de um Trion se chegarem simultaneamente.

Aquilo que chamamos de "conectividade estruturada" neste modelo, e' ilustrada na fig. 5: cada Trion recebe conexoes apenas dos primeiros e segundos vizinhos mais proximos, dentro de uma mesma rede (ou "coluna"), e dentro dos dois passos de tempo anteriores. Este tipo de rede evolui de forma "paralela", com todos os trions atualizando seu estado simultaneamente.

Denomina-se MP (abreviatura de "Magic Pattern", ou ainda, "Mais Provavel"), qualquer padrao espaco-temporal de atividade das minicolunas, que tenda a se repetir em ciclos sucessivos. Cada MP, entao, carregaria dentro de si alguma informacao intrinseca, resultado do processamento da rede a partir de um de seus possiveis estados iniciais; ou seja, a evolucao da rede corresponderia ao processamento de um conjunto de estímulos externos (ou internos). Uma memoria, por exemplo, nao estaria, entao, enderecada em um unico neuronio, mas em toda a Rede, como uma consequencia direta da forma na qual seus neuronios se interconectam e determinam sua atividade recirculante.

"Repertorio" e' o conjunto de todos os possiveis MPs de uma rede, apos faze-la evoluir a partir de todos os possiveis estados iniciais. A riqueza de repertorio e' a propria base da riqueza de comportamento de um sistema, pois quanto maior o seu numero de MPs, maior o numero de respostas que a rede sera' capaz de reali-

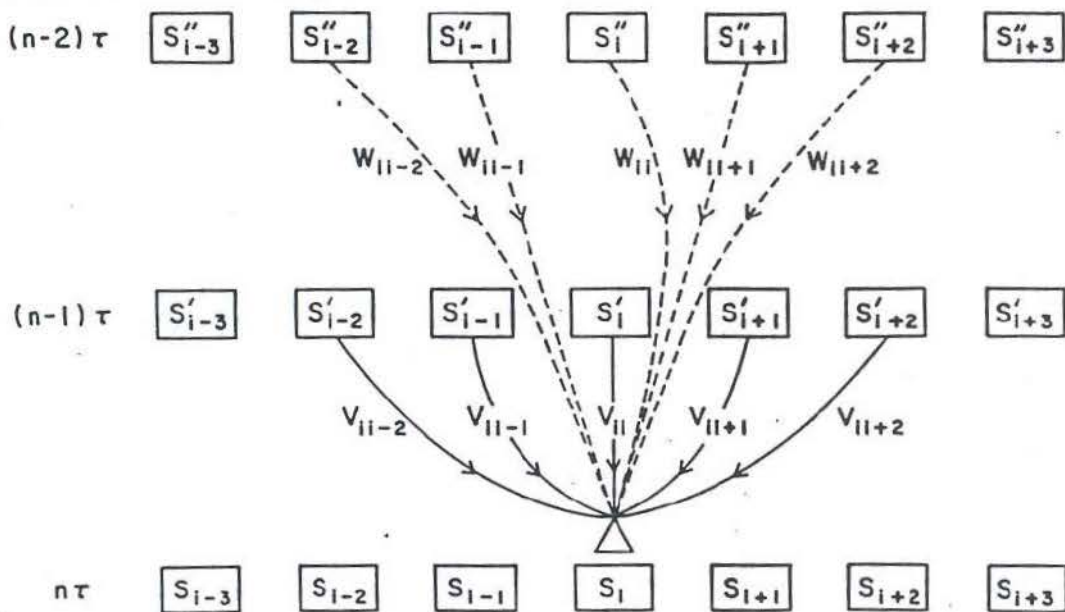


Fig. 5 - Um rede "colunar", composta por Trions (minicolunas) em tres (3) passos de tempo discretos (τ), e mostrando os estados de disparo S e as conexoes V e W . Segundo Shaw, τ sera' de cerca de 25-100 ms. Devido a chegada mais lenta dos potenciais pos-sinap-ticos inibitorios, em relacao aos excitatorios, espera-se que os V s sejam predominantemente excitatorios, e os W s, inibitorios. Para NA Trions, usa-se a condicao de "anel" Trion $i =$ Trion $i+NA$.

zar.

O computo das aferencias a cada Trion faz-se conforme a equação abaixo, que calcula a Probabilidade de cada um dos tres estados possiveis acontecer:

$$P(S_i) = \frac{g(S) \exp(B * M_i * S)}{\sum_s g(s) \exp(B * M_i * s)} \quad (\text{eq.1})$$

onde, S_i = Estados possiveis, + (+1), 0 (0) e -(-1)

$g(s)$ = constantes de degenerescencia
de cada nivel de atividade

$$B = 1 / T$$

e onde M_i , tambem chamado de "Campo Local", e' dado por:

$$M_i = \sum_j (V_{ij} * S_j(t-1) + W_{ij} * S_j(t-2)) - V_i \quad (\text{eq.2})$$

com, V_{ij} = conexao aferente ao Trion i , partindo do Trion j
e do passo de tempo imediatamente anterior;

W_{ij} = conexão aferente ao Trion i , partindo do Trion j
como fatores de e de dois passos de tempo anteriores;

$S_j(t')$ = nível de atividade do Trion j , no passo de
Trion (dentro do tempo t');

V_i = limiar do Trion i .

Neste cálculo obtém-se três diferentes valores de probabili-
dades, uma para cada possível estado de atividade, respectiva-
mente, baixa (-), média (0) e alta (+) atividade.

Como, então, é determinado estado do Trion utilizando-se
estas probabilidades? Empregamos o chamado "Modo Determinista",
onde usa-se o estado de atividade associado à maior das três pro-
babilidades calculadas.

Neste modo de cálculo, diferentes temperaturas proporcionam
diferentes comportamentos, interessantes de ^{se} observar, já que
traduzem uma possível função modulatória da temperatura. Existe
uma outra forma de escolher o estado do Trion, que é o chamado
"algoritmo Montecarlo": divide-se em três o intervalo dos números
reais entre zero e um, e associa-se a cada intervalo um dos três
possíveis estados de atividade, conforme sua probabilidade de
ocorrência (quanto maior a probabilidade calculada, maior o trecho
correspondente no intervalo). Atualiza-se o Trion com um novo
estado de atividade, gerando um número randômico e posicionando-se
o mesmo no intervalo [0,1]. Apesar de probabilidades maiores terem
mais chances de ser selecionadas, há sempre a possibilidade de
ser escolhida qualquer uma das probabilidades menores.

As constantes de degenerescencia "g" da equacao 1 funcionam como fatores de ponderacao estatistica e levam em conta o numero de configuracoes de atividade equivalentes dos neuronios internos ao Trion (dentro da minicoluna).

O parametro B (que corresponde ao inverso do valor da temperatura da Rede), representa, no Modelo, a natureza nãodeterministica da quantidade de neurotransmissores liberados em uma sinapse, uma expressao do "ruído", portanto.

Um dos aspectos mais importantes do Modelo e' o pequeno numero de MPs que se obtem a partir de um grande numero de estados iniciais, num claro exemplo de "convergencia" comportamental. Isto permite que um grande numero de estados iniciais estejam associados a um MP, ou levem a este MP, da mesma forma que, no ambito biologico, um grande numero de estímulos estariam agrupados segundo uma propriedade em comum, ou promovam uma resposta comum. Esse conjunto de estados iniciais associados que levam a um mesmo MP e' a sua "Bacia de Atracao".

Em cada bacia de atracao, os transientes entre cada estado inicial e o MP, ou "atrator", consomem alguns poucos passos de tempo (uma das variaveis que estudaremos: ^aeste transiente, denominaremos "Tempo de Relaxamento").

Pela concepcao de Repertorio, o comportamento de qualquer rede fica restrito a um conjunto de possibilidades teoricamente previsíveis. Ou seja, conhecendo-se suas conexoes e sua temperatura,

seria possível, em princípio, detectar-se a quais padrões espaço-temporais sua atividade tenderia, e a quais, não. Pela indeterminabilidade na transmissão do sinal, porém, talvez não se pudesse prever com absoluta precisão a qual MP a rede tenderia.

Quaisquer alterações nos valores das conexões e da temperatura implicariam na alteração das Bacias de Atracção de uma rede, bem como na composição do próprio Repertório. Nenhum MP seria, porém, virtualmente criado "do nada": um MP surge quando um padrão passa a ter maior probabilidade relativa de ocorrência, em relação a outros padrões.

O Modelo do Trion permite, também, tratar matematicamente do fenómeno de aprendizagem, através de uma mudança criteriosa dos pesos nas conexões da rede, segundo um algoritmo dito "hebbiano", o que reduz o valor energético do padrão que se deseja reforçar. Em nosso trabalho, contudo, não estudamos o aprendizado.

Um aspecto que caracteriza a relevância da temperatura no Modelo é a existência de faixas de temperatura com diferentes repertórios (McGrann et al., 1991). As temperaturas que delimitam as faixas são chamadas de "Temperaturas Críticas" (TCs). As transições de fase aparecem em temperaturas próximas a estas TCs.

Conforme se ~~pode~~ observar no gráfico na figura 6 (McGrann et al., 1991), os repertórios, em cada faixa de temperatura, diferem bastante quanto ao número de MPs. Diferem, muitas vezes, até no tipo de MPs: à medida que a temperatura decresce (B aumenta), os

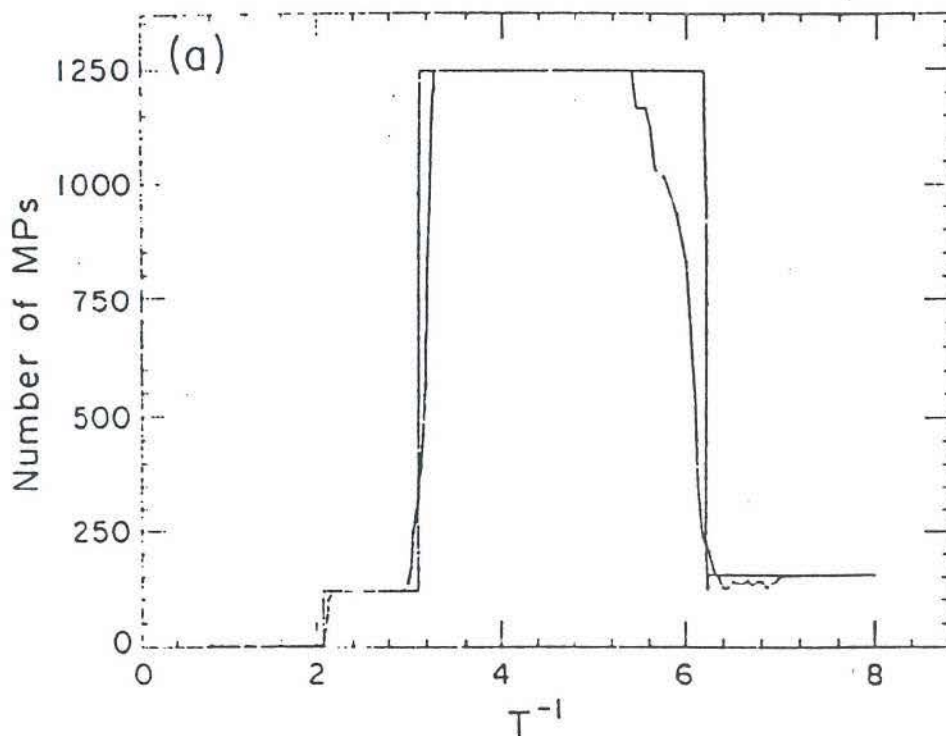


Fig. 6 - O numero de MPs em um Repertorio versus o parametro de flutuacao B para dois conjuntos de calculos em uma rede de $NA=6$ Trions com conexoes simetricas (ver texto) modificadas, respectivamente por variacoes ao acaso de 1% e 3% (para mostrar a robustez dos resultados). As transicoes de fase sao os $B(n)$ dados pela equacao 3 (extraido de McGrann et al., 1991).

MPs tendem a possuir um menor numero de estados intermediarios (ou seja, $S=0$), o que, neste trabalho, denominaremos "numero de zeros".

O valor das temperaturas criticas (TCs) esta intimamente relacionado com o valor das conexoes da rede, bem como com a razao entre as constantes de degenerescencia (g) e o limiar dos Trions (V_i). No caso de uma rede com limiares iguais a zero e conexoes $V_{i,i-1} = V_{i,i+1} = +1$, $V_{i,i} = +2$ e $|W_i| = -|V_i|$, ou seja, com as chamadas "Conexoes Simetricas", teremos que (McGrann et al., 1991):

$$B(n) = \frac{\ln (g(0) / g(+ \text{ ou } -))}{n} \quad (\text{eq. 3})$$

onde: $n = 1, 2, 3 \dots$

$$g(+) = g(-) \ll g(0)$$

Shaw e colaboradores mostraram que estas redes apresentam comportamento bastante diversificado, quando sua temperatura esta proxima a uma TC, com atualizacao dos estados dos Trions via Montecarlo. Sua atividade pode variar entre MPs dos repertorios das faixas vizinhas ("Modo Criativo"). Em temperaturas mais distantes das fases de transicao, apenas os MPs daquela faixa de temperatura ocorrerao ("Modo Analitico"). O Modo Determinista nao permite a oscilacao entre Repertorios de MPs de duas diferentes faixas de temperatura, mesmo que a temperatura da rede seja muito

proxima a uma TC. de repertorio possivelmente quando, as as altera-
es as conexoes automaticamente se tem alteradas as

A existencia de faixas de temperatura releva, por conseguinte, o papel modulatorio da temperatura. Em vista deste fato, postula-se a possivel atuacao de neuromoduladores na alteracao da "temperatura" de redes neurais biologicas, tendo como consequencia, a mudanca de comportamento destas redes (Shaw e Vasudevan, 1975; Shaw, Silverman e Pearson, 1988).

A conectividade estruturada entre os Trions possibilita uma grande rapidez de processamento, isto e', um pequeno tempo de relaxamento, se comparado as redes de conectividade randomica (como, por exemplo, as redes de Hopfield). Esta diferenca de comportamento e' mais acentuada a medida que cresce o numero de unidades de processamento das redes. Vem, portanto, em apoio a hipotese de Mountcastle sobre a organizacao colunar do cortex mamifero e seu papel nas funcoes cerebrais superiores, que esta incorporada ao modelo.

Uma outra consequencia da conectividade estruturada e' que ela permite a existencia de padroes espaco-temporais complexos de atividade, os quais, em boa parte, tambem se devem ao emprego de dois ou mais passos de tempo no calculo dos Mi (campos locais).

As conexoes em uma rede de Trions influem em seu comportamento segundo dois aspectos: seus valores e sua simetria.

As mudancas de repertorio podem ocorrer quando, ao se alter-
arem as conexoes, automaticamente se tem alteradas as faixas, ou
"fases", de temperatura.

A simetria das conexoes, como ja' definimos, ocorre quando
 $V_{i+n} = V_{i-n}$ e $W_{i+n} = W_{i-n}$, ou seja, o valor das conexoes que par-
tem de um Trion sao os mesmos, nao importando se o Trion que ira'
recebe-las esteja a sua direita ou a sua esquerda. Apenas a proxi-
midade influi.

Segundo o trabalho de McGrann (1991), pequenas quebras de
simetria, com temperaturas nas fases de transicao, diminuem o
repertorio da rede, bem como lhes aumenta o tempo de relaxamento.
Certos MPs ~~tem~~ seus numeros de ocorrencias aumentados, em detri-
mento de outros. Este fato corresponderia a aprendizagem, na rede
de um certo padrao que sera' reforcado, por exemplo.

2. OBJETIVOS E METODOS

Os objetivos deste trabalho foram:

- verificar o efeito da mudança de temperatura em redes de mesmas conexoes, sobre as Probabilidades de Ciclagem, o numero de zeros e o numero de MPs no Repertorio, bem como sobre a "energia" media dos MPs [definicao de todas estas variaveis: materiais e metodos];

- avaliar a influencia, em diferentes temperaturas, de diferentes valores de conexoes, sobre o tamanho dos MPs (em ciclos), bem como sobre os tempos de relaxamento, as probabilidades de ciclagem e o numero de MPs nos Repertorios, principalmente no que se refere as quebras de simetria;

- observar a influencia do numero de passos de tempo (NPS) utilizados no calculo do Campo Local (Mi) sobre a riqueza de comportamento da rede (numero e tamanho em ciclos dos MPs);

- correlacionar energia de um MP com seu numero de ocorrencias e sua probabilidade de ciclagem.

3. MATERIAL E METODOS

Para a consecucao dos objetivos deste trabalho foram realizadas simulacoes no computador CRAY Y-MP 2E do Centro de Supercomputacao da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a partir de codigo escrito em FORTRAN 77. As simulacoes deste trabalho nao foram realizadas no CRAY porque elas necessitassem do seu enorme potencial (tanto em memoria operacional, quanto em velocidade de processamento), mas porque essa era a maquina disponivel e, tambem, aquela na qual estudos com este modelo ja' vinham sendo desenvolvidos.

O programa basicamente implementa as equacoes 1 e 2, que permitem o calculo do estado que cada Trion da rede assumira' a partir do conhecimento dos estados e valores de conexao de seus primeiros e segundos vizinhos, nos dois passos de tempo anteriores.

Cada simulacao consistiu da evolucao, em trinta e cinco passos de tempo, de todos os estados iniciais de redes de quatro Trions, usando-se o Modo Determinista. Os parametros de cada rede eram previamente estabelecidos em um arquivo de entrada: NPS, conexoes (V_s e W_s), limiares (L_s) e temperatura ($T = 1 / B$). Em todas as redes, as conexoes laterais eram zero ($XL_s = 0$) e as constantes de degenerescencia, $g(0) = 500$ e $g(+)$ e $g(-) = 1$. Cada estado inicial foi identificado por um indice ternario univoco (ID), segundo o somatorio abaixo:

$$ID = \sum_{t=1}^2 \sum_{N=1}^{NA} Si(t) * (3 ** ((t-1)*N + N - 1))$$

(eq.4)

onde, NA = numero de Trions;

Si(t) = estado do Trion, no instante t.

Da evolucao de cada estado inicial procurou-se identificar a qual MP a sua atividade conduzia, a ciclagem deste MP e o tempo de relaxamento. Aa medida que um MP reaparecia, incrementava-se seu numero de ocorrencias.

Apos executados todos os estados iniciais, calculavam-se as caracteristicas dos MPs: probabilidade de ciclagem (PCs), "energia" media (por passo de tempo), media dos tempos de relaxamento e configuracao. Determinavam-se ainda as caracteristicas mais gerais do repertorio, tais como seu numero medio de zeros e a media da atividade de cada trion (ambos por passo de tempo).

As PCs foram calculadas conforme a equacao 5, onde e' feita a multiplicacao de todas as probabilidades individuais de cada Trion dentro do ciclo (probabilidades condicionadas):

$$PC = \prod_{i=1}^{NA} P(Si(t)) \quad ? \quad (eq.5) \quad \Pi$$

O numero de zeros de cada simulacao foi calculado conforme o seguinte algoritmo:

- dividiu-se o numero de estados intermediarios em um ciclo de cada MP pelo valor de sua ciclagem;

$$\sum_0$$

- destes valores, fez-se a media ponderada dos mesmos, tomando-se como base o numero de ocorrencias de cada MP. Logo, tomou-se o numero de S=0 por passo de tempo.

O calculo da "energia" media, por passo de tempo (portanto, ponderada sobre as dimensoes do ciclo), foi feito segundo a seguinte expressao, por nos proposta:

$$E = - \sum_{\text{Ciclo}} \left(\frac{S_i(t) * (V_{ij} * S_j(t-1) + W_{ij} * S_j(t-2))}{\text{CIC}} \right) \quad (\text{eq.6})$$

Como a equacao 1 e' analoga 'a Distribuicao de Probabilidades de Boltzmann, propomos o somatorio acima como representativo do valor energetico medio de um MP (equacao acima).

O programa e' alimentado por um arquivo de entrada contendo todos os dados necessarios 'a simulacao (figura 7).

Arquivo "ciclos.in" 13 lines, 527 characters

```
10.iteste          [I] - Filename
4                  [I] - Number of trions/net (NA) (Max = 7)
2                  [I] - Timesteps of Interaction (NPS)
1                  [I] - Number of temperatures (limit=8)
2.000             [I] - Temperature(s)
0.0 0.0 0.0 0.0   [No.=NA] - BIAS values per trion (=other nets)
0.0 0.90 1.90 1.10 0.0
0.0 -0.90 -1.90 -1.10 0.0 [No.=5/NPS] - Internal Conn. VW's for init. net
```

(Do not use Zs=0 and NPS=3 at the same time)

Fig. 7 - Exemplo tipico de Arquivo de entrada (ciclos.in) empregado nestas simulacoes para fazer funcionar o programa utilizado. BIAS sao os limiares VI.

*** Padrões Magicos ***

01. teste (SIMULACAO)
 Val 0.00 1.00 2.00 1.00 0.00 (VALORES DAS CONEXOES)
 Min 0.00 -1.00 -2.00 -1.00 0.00

Limites : 0.00 0.00 0.00 0.00 (VALORES DOS LIMITES)

B 6.5000 (VALOR DE L / T)

Media Geral de Chegadas: 2.7167 (MEDIA GERAL DOS TEMPOS DE RELAXAMENTO)

CICLO= 1 (TAMANHO DO CICLO DO MP)

IDs: (NUMEROS DE IDENTIDADE DOS MPs)

3300

Paquetes: (UNIDADES DE CICLAGEM DOS MPs)

0.9211337

Numero de Ocorrencias: (NUMERO DE ESTADOS INICIAIS QUE SE CONHECEM DO MP)

Media da "Energia" dos MPs, por passo de tempo: (MEDIA DA "ENERGIA" DE CADA MP)
 0.00

Medias de Chegadas: (MEDIA DOS TEMPOS DE RELAXAMENTO DAS

1.3354 EVOLUCOES QUE EVOLVEM AO SEU RESPECTIVO

MPs: TIPO MP)

0000 (PADRAO ESPACO-TEMPORAL QUE DEFINE O MP)

CICLO= 6

IDs:

0	1	3	9	27	410
421	434	574	582	577	656
664	680	1968	1320	1328	1230
1312	1317	1331	1374	1402	1407
1722	2050	2078	2624	2670	

Paquetes:

0.9685604	0.0110505	0.0110505	0.0110505	0.0110505	0.1007789
0.1019393	0.1019393	0.1007789	0.1019393	0.1019393	0.9512212
0.9512212	0.9512212	0.9512212	0.9512212	0.9512212	0.1007789
0.9296858	0.1019393	0.1019393	0.1007789	0.1019393	0.1019393
0.1007789	0.1007789	0.1007789	0.9296858	0.1007789	

Numero de Ocorrencias:

2720	784	784	784	784	18
8	8	18	8	8	168
30	30	168	30	30	18
16	8	8	18	8	8
18	18	18	16	18	

Media da "Energia" dos MPs, por passo de tempo:

-5.33	-5.33	-5.33	-5.33	-5.33	-2.00
-2.67	-2.67	-2.00	-2.67	-2.67	-2.67
-2.67	-2.67	-2.67	-2.67	-2.67	-2.00
-1.33	-2.67	-2.67	-2.00	-2.67	-2.67
-2.00	-2.00	-2.00	-1.33	-2.00	

Medias de Chegadas:

2.8860	2.9107	2.9107	2.9107	2.9107	0.8869
0.2500	0.2500	0.8869	0.2500	0.2500	1.5833
1.0667	1.0667	1.5833	1.0667	1.0667	0.8869
0.8750	0.2500	0.2500	0.8869	0.2500	0.2500
0.8869	0.8869	0.8869	0.8750	0.8869	

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

MPs:

```

----- 0----- -0----- --0--- ----0 +0---
----- 0----- -0----- --0--- ----0 +0---
0000 ---0- ---0- 0----- -0--- 0000
+++++ 0+++ +0++ +0+ +0+ +0+ -0++
+++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ -0++
0000 +0+ +0+ 0+++ +0+ 0000

0+0- +---0 0+--- --+0- +0-0 ++---
+0- +0- 0+--- 0+--- 0+--- +---
+---0 0+0- 0000 +0-0 --+0- 0000
0-0+ --+0 0+--- +0+ +0+ -0+0 --+0
-0+ -0+ 0+--- 0+--- 0+--- --+0
--+0 0-0+ 0000 -0+0 +0+ 0000

0+0- +0-0 --+0- --+0- +0-0 --+0-
+--- +--- +--- (0+0 0+0) --+0-
+0-0 0+0- 0000 +0-0 --+0- 0000
0-0+ -0+0 +---+ +---+ -0+0 +0+
--+0 --+0 +---+ 0-0+ 0-0+ +0+
-0+0 0-0+ 0000 -0+0 +---+ 0000

0+0- -0+ -0+0 +0-0 0+--- +0-0
0+0- 0+0- 0+0- +0-0 +0-0 +0-0
0000 +0-0 -0+0 0000 +0-0 0+---
0-0+ +0+ +---0 --+0 0+--- -0+0
0-0+ 0-0+ 0-0+ --+0 --+0 --+0
0000 --+0 +0+ 0000 -0+0 0+---

--0+ 0+--- +---0 +0-0 ++-0
-0+ 0+--- +---0 +0-0 ++-0
0000 0000 0000 0000 0000
+0+ 0+--- --+0 -0+0 --+0
+0+ 0+--- --+0 -0+0 --+0
0000 0000 0000 0000 0000

```

Medias de Numero de Zeros, por passo de tempo, para cada temperatura:

TEMP: 6.5000 => No. de zeros: 1.0309

(NUMERO DE ZEROS DO REPERTORIO)

Fig. 8 - Exemplo de Relatório de Simulação.

A partir dos dados acima, gera-se um relatório para cada simulação, conforme mostrado na figura 8 (partes 1 e 2), para a simulação Olteste. O conjunto de todas as simulações realizadas está contido na tabela 1, partes 1, 2 e 3, e na tabela 2.

Parametros da Rede

Conexoes	$V_{i,j}^{(1)}$ $W_{i,j}^{(1)}$	$V_{i,j}^{(2)}$ $W_{i,j}^{(2)}$	$V_{i,j}^{(3)}$ $W_{i,j}^{(3)}$	Simulacao	B
01teste	1,00 -1,00	2,00 -2,00	1,00 -1,00	01.1teste	2,00
				01.2teste	3,07
				01.3teste	3,10
				01.4teste	3,11
				01.5teste	4,00
				01.6teste	5,00
				01.7teste	6,21
				01.8teste	6,50
				01.9teste	7,00
				01.10teste	13,00
				01.11teste	20,00
				01.12teste	40,00
				01.13teste	65,00
				01.14teste	2,00
05teste	0,70 -1,20	1,70 2,10	1,10 -0,00	05.1teste	2,00
				05.2teste	5,00
				05.3teste	6,50
				05.4teste	7,00
				05.5teste	13,00
				05.6teste	15,00
				05.7teste	18,00
				05.8teste	20,00
				05.9teste	23,00
				05.10teste	25,00
				05.11teste	65,00
06teste	5,00 -1,00	5,00 -1,00	5,00 -1,00	06.1teste	0,50
				06.2teste	0,55
				06.3teste	0,69
				06.4teste	0,77
				06.5teste	1,00
				06.6teste	1,50
				06.7teste	2,00
				06.8teste	3,00
				06.9teste	5,00
				06.10teste	6,50
				06.11teste	40,00

07teste	1,00	1,00	1,00	07.1teste	6,50
	-5,00	-5,00	-5,00		

10teste	0,90	1,90	1,10	10.1teste	2,00
	-0,90	-1,90	-1,10	10.2teste	5,00

11teste	0,90	2,00	1,10	10.3teste	6,50
	-1,10	-2,00	-0,90	10.4teste	7,00
				10.5teste	20,00
				10.6teste	65,00

12teste	0,97	2,00	1,03	11.1teste	6,50
	-1,10	-2,00	-0,90	11.2teste	65,00

13teste	0,97	1,97	1,04	12.1teste	5,00
	-1,03	-2,03	-0,98	12.2teste	6,50

15teste	0,00	4,00	0,00	13.1teste	5,00
	-0,00	-2,00	-1,00	13.2teste	6,50
				13.3teste	7,00
				13.4teste	9,00
				13.5teste	13,00
				13.6teste	20,00
				13.7teste	40,00
				13.8teste	50,00
				13.9teste	65,00

16teste	1,00	1,00	1,00	15.1teste	2,50
	-0,00	-0,00	-0,00	15.2teste	3,00
				15.3teste	4,00
				15.4teste	6,50
				15.5teste	20,00
				15.6teste	1,00
				15.7teste	1,30
				15.8teste	1,50

17teste	-5,00	1,00	3,00	16.1teste	5,50
	1,00	-0,20	-0,60	16.2teste	13,00
				16.3teste	20,00

17.1teste	2,00
17.2teste	4,00
17.3teste	20,00
17.4teste	65,00

18teste	-1,00	0,00	-1,00	18.1teste	2,00
	0,00	-0,00	-0,00	18.2teste	5,00
				18.3teste	6,50
				18.4teste	20,00

21teste	1,00	1,00	1,00	21.1teste	0,50
	-1,00	-1,00	-1,00		

22teste	0,78	1,97	1,01	22.1teste	6,50
	-1,02	-2,03	0,77		

23teste	-1,00	2,00	-1,50	23.1teste	6,50
	0,00	0,00	0,00		

24teste	-1,00	2,00	-1,00	24.1teste	5,00
	0,00	0,00	0,00	24.2teste	6,50

Tabela i - Simulações realizadas, cujos triângulos tiveram limites nulos ($V_s = 0$).

Parametros da Rede

Conexoes $V_{i,i-1}$ $V_{i,i}$ $V_{i,i+1}$
 $W_{i,i-1}$ $W_{i,i}$ $W_{i,i+1}$

Limitares V_1 V_2 V_3 V_4 Simulacao B

14teste -1,00 0,00 -1,00
 0,00 0,00 0,00

0,00 -1,50 0,00 0,00

0,00 -0,50 0,00 0,00

0,00 -1,00 0,00 0,00

0,00 -1,00 -1,00 0,00

14.1teste 0,50

14.2teste 0,50

14.3teste 0,50

14.4teste 0,50

Tabela 2 - Simulacoes realizadas com limitares diferentes de zero, em pelo menos um dos Trons da rede.

4. RESULTADOS

Os resultados, que passamos a mostrar a seguir, foram obtidos a partir da apreciação de um grande número de simulações, que, de nenhuma forma, esgotam todo o universo de possibilidades combinatorias que poderíamos explorar modificando as variáveis do modelo. Nossas simulações se concentraram no estudo de algumas relações, conforme especificado nos Objetivos dessa Dissertação. Para tanto, em cada tema estudado, foi realizado um certo número de simulações até constatar-se a reprodutibilidade e confiabilidade das observações. Este tipo de estudo não empregou nenhuma análise de significância estatística para substanciar suas conclusões, que, portanto, são apenas de caráter qualitativo.

4.1 - Efeitos da Temperatura (em redes com NPS=2)

4.1.1 - Sobre as Probabilidades de Ciclagem

A partir do gráfico da figura 9, observa-se a variação das FCs dos MPs com IDs = 0,1,2296 e 3280, nas simulações de 0 teste.

As probabilidades de ciclagem variaram de diferentes maneiras:

- no caso do MP com ID = 3280, a FC manteve-se constante em qualquer temperatura. Já nos outros MPs, as FCs deixavam de ser

43

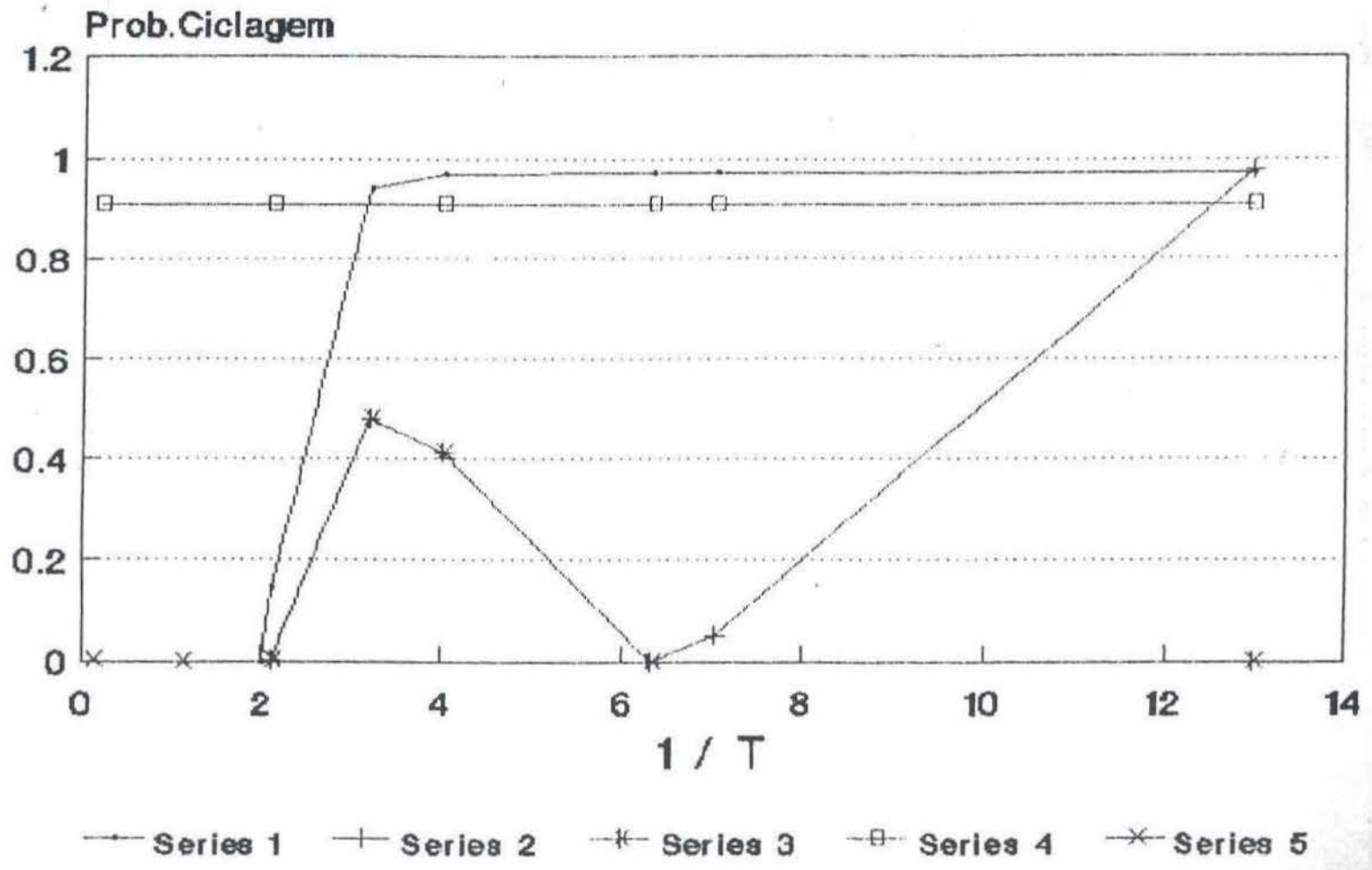


Fig.9-Variacao das PCs com a Temperatura

zero apos uma determinada temperatura critica;

- no MP de ID = 2296, as PCs cresceram ate' um valor maximo, voltando a decrescer logo a seguir, voltando a ser novamente zero em nova temperatura critica (no caso, nao necessariamente a temperatura critica seguinte);

- nos MPs de IDs = 0 e 1, as PCs cresceram assintoticamente, tendendo a PC=1.

Nestas simulacoes, nao foram encontrados MPs que desapareceram em uma faixa de temperatura, e voltaram a aparecer em nova faixa. Apenas o MP de ID=3280 nao apresentou probabilidade de ciclagem estritamente crescente com B (tendendo a 1), a partir de $B = \ln(500)$.

4.1.2 - Sobre o Numero de Zeros:

Em quase todas as redes com as mesmas conexoes e em diferentes faixas de temperatura, o numero de zeros diminuiu com a diminuicao da temperatura (aumento de B). A unica excecao ocorreu com as redes de conexoes 13teste, a baixas temperaturas (ver tabela 3). Redes na mesma faixa de temperatura tinham apenas suas probabilidades de ciclagem diferentes.

Conexões	B	No. de Zeros	Conexões	B	No. de Zeros
teste	2,00	3,9037	10 teste	2,00	3,9037
	2,07	3,1392		5,00	1,8077
	5,00	1,8442		6,50	1,1456
	7,00	1,0309		20,00	1,0151
	25,00	1,0309		65,00	1,0005
	40,00	1,0309			
65,00	1,0309				
teste	2,00	3,9000	11 teste	5,00	1,8442
	5,00	1,6187		6,50	1,3467
	7,00	1,2419		7,00	1,0761
	25,00	0,9005		13,00	1,0309
	65,00	0,0713		20,00	1,0309
16 teste	0,69	3,7305		40,00	1,0614
	0,77	3,5415		50,00	1,0383
	1,50	1,2590		65,00	1,0456
	3,00	0,2835			
	5,00	0,1957			
	6,50	0,0104			
	40,00	0,0104			

Tabela 3 - Variação do número de Zeros de redes de mesmas conexões, a diferentes valores de temperatura ($T = i / D$).

4.1.3 - Sobre o Numero de MPs (Riqueza do Repertorio)

Para todas redes com as mesmas conexoes, as temperaturas extremas (Bs baixos ou altos) proporcionaram repertorios com menor numero de MPs do que temperaturas consideradas, aqui, "intermediarias". Aquilo que chamamos de "temperaturas intermediarias", variava conforme o valor das conexoes empregadas. O numero de MPs, nestas temperaturas "intermediarias", oscilou nas simulacoes de conexoes 06teste e 10teste. A tabela 4 ilustra estes resultados.

4.1.4 - Sobre a "Energia" Media dos MPs

Observando as simulacoes de conexoes 01teste, 05teste e 10teste, verificou-se uma tendencia a diminuicao dos valores medios das "energias" (conforme definimos na equacao 6) dos MPs, por passo de tempo, a medida que diminuiu a temperatura (B aumentou). O numero de ocorrencias dos MPs de baixa energia tambem aumentou, em relacao aos MPs de alta energia, com a diminuicao da temperatura. A tabela 5, partes 1, 2 e 3, mostra a relacao entre o numero de ocorrencias dos MPs, bem como seus valores de "energia" media, em redes de conexoes 01teste, em diferentes temperaturas. Mas ATENCAO: por um equivoco, os valores das energias sairam com exatamente a metade de seu valor; esse erro, contudo, nao afeta as conclusoes a que chegamos.

Conexões	δ	Nº. de NPs	Conexões	δ	Nº. de NPs
0 teste	2,00	2	0 teste	0,00	3
	2,07	14		0,77	5
	3,00	46		1,50	22
	7,00	39		3,00	16
	20,00	32		5,00	20
	30,00	30		6,50	12
55,00	30	40,00	10		

0 teste	2,00	3	0 teste	2,00	3
	5,00	34		5,00	46
	7,00	32		6,50	16
	20,00	32		20,00	31
	55,00	31		55,00	19

Figura 4 - Variação do número de nós de redes de mesmas conexões, em diferentes valores de temperatura ($f = 1 / 0,1$).

Conexões

Vs= 0.00 1.00 2.00 1.00 0.00
Ws= 0.00 -1.00 -2.00 -1.00 0.00
Zs=

Limites : 0.00 0.00 0.00 0.00

B= 2.0000

CICLO= 1

ID:

3280

Probabilidade de Ciclagem:

0.9841587

Numero de Ocorrências:

6325

Media da "Energia" do MP, por passo de tempo:

0.00

CICLO= 2

ID:

0

Probabilidade de Ciclagem:

0.0810294

Numero de Ocorrências:

236

Media da "Energia" do MP, por passo de tempo:

-5.33

B= 2.0000

CICLO= 1

ID:

3280

Probabilidade de Ciclagem:

0.9841587

Numero de Ocorrências:

3325

Media da "Energia" do MP, por passo de tempo:

0.00

CICLO= 6

IDs:

0	4	738	121	2214	82
28	36	246	2752	2276	784
328					

Probabilidades de Ciclagem:

0.8485262	0.3113823	0.0712931	0.3113823	0.0712931	0.0712931
0.3113823	0.3113823	0.0712931	0.3184915	0.3184915	0.3184915
0.3184915					

Numero de Ocorrencias:

420	38	190	38	190	190
38	38	190	476	476	476
476					

Media da "Energia" dos MPs, por passo de tempo:

-5.33	-4.67	-3.33	-4.67	-3.33	-3.33
-4.67	-4.67	-3.33	-2.00	-2.00	-2.00
-2.00					

H= 3.0000

CICLO= 1

IDs:

3280

Probabilidades de Ciclagem:

.98415873

Numero de Ocorrencias:

97

CICLO= 6

IDs:

0	4	12	28	36	2296
328	332	335	336	337	340
352	356	360	2542	2300	784
1066	988	656	664	2752	680
3034	976	2299	2550	2305	2543
585	1011	1000	1003	3198	1067
1090	2953	2624	2955	1312	1320
1328	2304	1968			

Probabilidades de Ciclagem:

.98415873	.12484645	.12484645	.12484645	.12484645	.12092283
.12092283	.10432588	.03973476	.11231821	.03973476	.11231821
.11231821	.11231821	.10432588	.10692106	.11231821	.12092283
.10692106	.11231821	.67632965	.67632965	.12092283	.67632965
.10117046	.10432588	.03973476	.10117046	.03973476	.10117046
.03973476	.03973476	.10432588	.11231821	.10692106	.10117046
.10117046	.03973476	.78392526	.03973476	.78392526	.67632965
.67632965	.11231821	.67632965			

Numero de Ocorrencias:

2464	278	298	298	298	204
204	56	60	50	60	50
50	50	56	104	50	204
104	50	48	18	204	18
104	56	60	32	60	32
60	60	56	50	104	32
32	60	88	60	88	18
18	50	48			

49

H= 7.0000

CICLO= 1

ID:

2280

Probabilidades de Ciclagem:

0.9841587

Numero de Ocorrencias:

7

Media da "Energia" dos MPs, por passo de tempo:

0.00

CICLO= 4

IDs:

0	1	3	9	27	410
421	434	574	532	599	656
664	600	1968	1320	1328	1230
1312	1317	1331	1374	1402	1409
1722	2050	2078	2624	2070	

Probabilidades de Ciclagem:

0.9685684	0.0486621	0.0486621	0.0486621	0.0486621	0.2117860
0.2148375	0.2148375	0.2117860	0.2148375	0.2148375	0.9621480
0.9621480	0.9621480	0.9621480	0.9621480	0.9621480	0.2117860
0.9350103	0.2148375	0.2148375	0.2117860	0.2148375	0.2148375
0.2117860	0.2117860	0.2117860	0.9350103	0.2117860	

Numero de Ocorrencias:

2720	784	784	784	784	18
8	8	18	8	8	168
30	30	168	30	30	10
16	8	8	18	8	8
18	18	18	16	18	

Media da "Energia" dos MPs, por passo de tempo:

-5.33	-5.33	-5.33	-5.33	-5.33	-2.00
-2.67	-2.67	-2.00	-2.67	-2.67	-2.67
-2.67	-2.67	-2.67	-2.67	-2.67	-2.00
-1.33	-2.67	-2.67	-2.00	-2.67	-2.67
-2.00	-2.00	-2.00	-1.33	-2.00	

Tabela 5 -- PCs, Numero de Ocorrencia e "Energia" Media dos MPs, em diferentes valores de temperatura, com condicao Oiteste.

4.2 Efeito de variações nos valores das Conexões

4.2.1 - Quanto à Simetria (para NPS = 2)

Em $B=6.5$, a simulação com conexões simétricas 01.8teste proporcionou menores tempos de relaxamento do que as simulações com conexões assimétricas 05teste, 10teste, 11teste, 13teste e 22teste (conforme mostra a tabela 6). Uma exceção ocorreu com a simulação 12teste (inclusive com 3% de assimetria).

Conforme pode se observar da tabela 7, as redes assimétricas acima apresentaram maior diversidade no tamanho dos MPs do que a rede simétrica estudada, em $B_s = 20, 25$ e 65 (ciclos 1,2,3,4,6,12 e 16). A rede simétrica manteve seu repertório em B_s superiores a $\ln(500)$, com um MP de ciclo 1 (ID=3280) e vinte e nove MPs de ciclo seis.

As diferenças de comportamento pela assimetria foram mais acentuadas em temperaturas menores, de acordo com o tamanho das diferenças: com pequenas assimetrias (aquelas com menos de 3% de variação em torno da simetria total), tais diferenças não ocorreram em $B=5$ (simulação 13teste); com grandes assimetrias, essas ocorreram em $B=5$ (05teste e 10teste). A tabela 8 ilustra bem os referidos resultados.

Uma observação interessante foram os MPs que apresentaram o que convencionamos chamar "Efeito Domino": o estado de cada Trion

Simulação	Tempo de Relaxamento	Grau de Assimetria
01	2,7167	conexoes simetricas
03	5,3374	grande assimetria
10	3,6366	grande assimetria
11	2,8252	grande assimetria
12	2,6776	pequena assimetria
13	5,2046	pequena assimetria
22	5,4614	pequena assimetria

Tabela 6 - Média dos tempos de relaxamento em redes de diferentes conexões, a B = 6,5.

Obs. O grau de assimetria foi avaliado segundo o valor aproximado de porcentagem dos desvios de simetria, em relação ao peso das conexões. Desvios inferiores a 3% foram considerados como de pequena assimetria.

Conexões	B	Tamanho dos Ciclos
01teste	25,00	1,6
	40,00	1,6
	65,00	1,6
02teste	20,00	1,4,6,16
	35,00	1,4,6,16
	65,00	1,3,4,6
10teste	20,00	1,4,6
	65,00	1,2,4,6
11teste	65,00	1,4,8
131teste	20,00	1,6
	40,00	1,6
	65,00	1,6,16

Tabela 7 - Tamanho de ciclos dos HFs, em redes de diferentes conexões, em baixos valores de temperatura ($T = 1 / B$).

Conexões	01teste	02teste	10teste	12teste	13teste
Grau de Simetria	S	GA	GA	PA	PA
Tempo de Relaxamento	2,7776	5,0034	2,8735	2,7776	2,7776
No. de H's	46	34	46	46	46
No. de Zeros	1,8442	1,6187	1,8677	1,8442	1,8442

Tabela 8 - Características gerais dos Repertórios de redes de conexões simétricas e assimétricas, em $B = 5,00$.
 OBS: S - conexões simétricas; GA - conexões com grande assimetria; PA - conexões com pequena assimetria.

"parece" ser transmitido a um de seus vizinhos, no passo de tempo seguinte. Este tipo peculiar de MP aparece com muita constancia em redes com conexoes assimetricas, em temperaturas baixas (Es altos). A figura 10 ilustra alguns exemplos de "efeito domino".

4.2.2 - Em Redes de NPS = 1 ($W=0$, com 1 so' passo de tempo)

Nas redes com NPS=1, isto e', naquelas onde so' conta o passo de tempo anterior ($|W| = 0$), houve menor numero de MPs em seus repertorios, bem como foram menores os valores de tempo de relaxamento e o tamanho medio dos ciclos (tabelas 9 e 10). A simulacao 06.10teste, se comparada 'a simulacao 07.1teste, resultou em repertorio mais pobre, com MPs mais simples.

Tentou-se comparar o caso $|W| \lll |V|$, isto e', $|W|$ tendendo a zero, com o caso $|W| = 0$; para tanto, as simulacoes 24.1teste e 24.2teste (estas, em relacao 'a simulacoes 01.6teste e 01.8teste) resultaram em repertorios e MPs mais pobres pelo menor numero de MPs e pelo menor tamanho de seus ciclos (tabela 10). Para relembrar quem e' quem nos codigos dos experimentos acima, remeta-se 'a tabela 1.

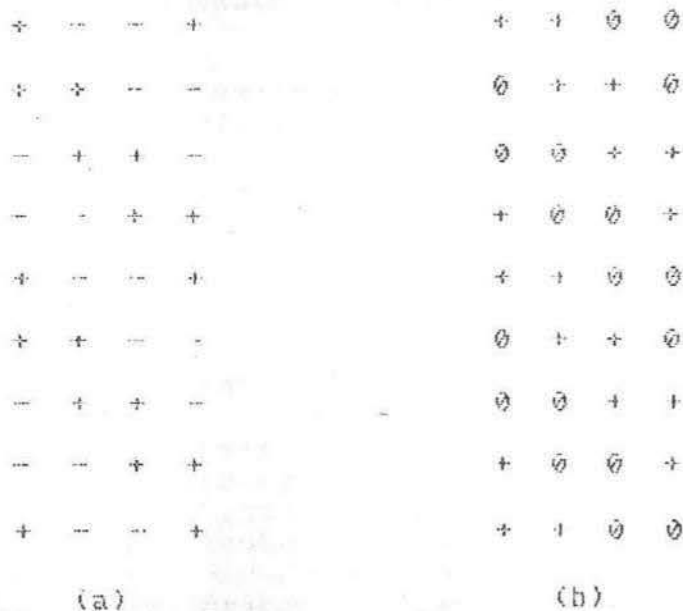


Fig. 10 - Exemplos de padroes contendo "Efeito Domino", onde o nivel de atividade de um Trion parece ser transmitido ao seu Trion mais proximo, a cada sucessao de estados da rede. O MP (a) ocorreu, por exemplo, na simulacao 05.1iteste; o MP (b), na simulacao 11.2teste.

NPS	Simulacao	B	Tempo de Relaxamento
1	18.1teste	2,80	0,9877
	18.2teste	5,00	0,8889
	23.1teste	6,50	1,1605
	24.1teste	5,00	0,7654
	24.2teste	6,50	0,9630
2	01.6teste	5,00	2,7776
	01.8teste	6,50	2,7167
	05.2teste	5,00	5,0834
	05.3teste	6,50	5,3394

Tabela 9 - Tempos de Relaxamento obtidos em algumas simulacoes, segundos diferentes valores de NPS.

NPS	Simulacao	B	No. de MP's	Tamanho dos Ciclos
1	18.2teste	5,00	6	1
	23.1teste	6,50	19	1,2
	24.1teste	5,00	27	1
	24.2teste	6,50	27	1
2	01.6teste	5,00	46	1,6
	01.8teste	6,50	30	1,6
	05.2teste	5,00	34	1,6
	05.3teste	6,50	26	1,6
	06.10test(*)	6,50	12	1,2
	07.1teste	6,50	51	1,2,4

Tabela 10 - No. de MP's e tamanho de seus ciclos em algumas simulacoes, segundo diferentes valores de NPS.
 (*) Simulacao onde as conexoes V eram bem maiores que as conexoes W.

4.3 - "Energia" Media, Numero de Ocorrencias e PCs

Observou-se, em cada simulacao a tendencia de MPs com menores valores de energia ocorrendo com maior frequencia ou tendo maiores probabilidades de ciclagem PCs (nao necessariamente ambos ao mesmo tempo). A tabela 5, partes 1, 2 e 3, mostra estes resultados, com conexoes Olteste.

4.4 - Estudo das variacoes nos Limiaries

Como vemos na tabela 2, foram realizadas algumas simulacoes visando analisar as consequencias da variacao dos limiaries sobre alguns dos parametros acima estudados. Como estes resultados foram meramente preliminares, com poucas simulacoes realizadas, nao nos sentimos seguros para discuti-los (nem constam dos objetivos). Assim, a tabela 2 visa apenas fazer constar que tal trabalho foi iniciado.

5. DISCUSSAO

Os resultados, como ja' dissemos, foram obtidos a partir da apreciacao de um grande numero de simulacoes, voltadas ao estudo de algumas relacoes que nos interessam. Em cada tema estudado, o numero de simulacoes era o necessario para que nos sentissemos seguros da reprodutibilidade e confiabilidade das conclusoes. Tambem ja' dissemos que nossas conclusoes sao de caracter predominantemente qualitativo, pois nenhuma analise de significancia estatistica foi realizada.

Como existe uma certa arbitrariedade na escolha dos aspectos notaveis que se deseja destacar nos resultados das simulacoes, particularmente daquelas oriundas de um modelo matematico tao abstrato, vale notar que nossa selecao foi norteadada por dois principios: (a) que o aspecto destacado tenha um evidente interesse biologico, como potencial provedor de elementos que guiem futuros estudos empiricos; (b) que o aspecto destacado seja de facil identificacao e de alta reprodutibilidade ao longo das simulacoes, o que da' confiabilidade as conclusoes, muito embora, como dissemos, sem o aval estatistico tradicional (sao conclusoes qualitativas).

Por fim, e' importante dizer que modelos matematicos baseados em equacoes nao-lineares, oferecem muita resistencia a estudos analiticos mais exatos (isto e', deducacao formal dos tipos de solucao), devendo, portanto, basear-se em simulacoes numericas, como as que fizemos, para obtencao de solucoes. E' um campo da matema-

tica que poderíamos chamar de "matemática experimental", pois como as soluções não podem ser previstas analiticamente, as equações devem ser "ensaiadas" numericamente, testando-se as mais variadas combinações de valores de suas variáveis, até se "extrair" suas características mais marcantes. Um exemplo de campo dessa nova matemática são os modelos de Caos em Sistemas Dinâmicos. O modelo do Trion, portanto, é outro exemplo dessa nova via de investigação matemática que obriga ao ensaio numérico, o que só pode ser feito de forma confiável em bons computadores.

* * *

Os resultados deste trabalho mostram a poderosa influência da temperatura sobre o comportamento das redes de Trions, reforçando a hipótese desta ter um importante papel modulatório sobre a função de redes neurais organizadas segundo os princípios embutidos no modelo do Trion.

Começemos com algumas considerações algébricas. Pela equação 1, existiriam apenas duas possibilidades em relação à maior das três probabilidades geradas que levam a $M = 0$:

- ser a do estado médio de atividade (de $S=0$), caso o limiar seja zero;

- ser a do estado médio ou do estado de valor contrário ao de seu limiar, caso seu limiar seja diferente de zero.

Para ambos os casos, convencionamos denominar o estado de

maior probabilidade de "Estado Default". A partir deste conceito, propomos, neste trabalho, uma outra definicao: "Intransigencia Minicolunar".

A "intransigencia minicolunar" seria o menor valor do modulo de M suficiente para que outro estado tenha a mesma probabilidade de ocorrencia que o estado default. Pela equacao, pode-se inferir que a intransigencia minicolunar varia com a temperatura.

Caso se tenha uma rede onde todos os Trions tenha limiares nulos ($V_{is} = 0$), seus estados default serao $S=0$. Entao, ao se re-escrever a equacao 1 utilizando-se:

$$g(S) / g(S=0) = \exp(-u^{**2} * S^{**2})$$

onde $u^{**2} = \ln(g(0) / g(+ ou -)) = \ln(500)$

A notacao de u^{**2} e' uma forma de dizer que este numero deve ser sempre um numero positivo. Assim, teremos

$$P(S_i) \text{ proporcional a } \exp(-u^{**2} * S^{**2} + B * M_i * S_i).$$

Observamos, entao, que, para um dado u^{**2} , e levando-se em conta ser a funcao $\exp(x)$ estritamente crescente em seu dominio, o valor do modulo $|M_i|$ para $P_i(+ ou -) = P_i(0)$, e' $|M_i| = u^{**2}/B$, pois:

$$- P_i(+) / P_i(0) = 1, \text{ se } -u^{**2} * S^{**2} + B * M_i * S = 0. \text{ Ou seja,}$$

se $B * Mi * Si = u^{**2} * S^{**2}$. Como $S=1$, $B > 0$ e $u^{**2} > 0$, deve-se ter $Mi > 0$, logo, $Mi = |Mi| = u^{**2} / B$;

- $Pi(-) / P(0) = 1$, se $- u^{**2} * S^{**2} + B * Mi * S = 0$, ou seja, $B * Mi * Si = u^{**2} * S^{**2}$. Como $S=-1$, $B > 0$ e $u^{**2} > 0$, deve-se ter $Mi < 0$, com $Mi = |Mi| = u^{**2} / B$.

Logo, a intransigencia minicolunar seria, em redes de limiares nulos, igual a $R = u^{**2} / B = u^{**2} * T$, com $u^{**2} = Ln(500)$. Ou seja, uma funcao da temperatura.

Uma previsao plausivel seria que, baixando-se o valor da temperatura (e, portanto, o valor da intransigencia minicolunar), o numero medio de zeros (estados intermediarios) nos MPs do repertorio tenda a baixar. Isto ocorre porque um mesmo M (diferente de zero) tem um maior efeito na atualizacao do estado de um Trion, se o B for maior, pois na exponencial ambos se multiplicam. Assim, fica mais provavel a ocorrencia de um dos estados nao-intermediarios (+ ou -), em detrimento de $S=0$. Os Resultados decididamente confirmaram tal suposicao.

As consequencias da variacao da intransigencia minicolunar com a temperatura sao dramaticas. Vejamos a citacao de McGrann (1991): " a riqueza total do Modelo do Trion se deve 'a competicao dos dois termos da exponencial [eq.1], que permitem a competicao entre o nivel de atividade $S = 0$ com os niveis $S = -1$ e $S = +1$, por um valor finito de M ".

Estados de atividade que não o default, poderiam ou não ter alta probabilidade de ocorrência, para um determinado valor de M , conforme a temperatura. Daí a ocorrência de faixas de temperatura com diferentes repertórios. Também podemos pressupor que, em redes com limiares $V_t = 0$, temperaturas extremas (muito altas ou muito baixas) levam o resultado da competição entre os termos da exponencial para $|S| = 0$, em temperaturas altas, e $|S| = 1$, em temperaturas baixas. Em temperaturas intermediárias ocorre um "equilíbrio de forças" e, por esta razão, seus repertórios são mais variados. Nossos resultados fortalecem esta constatação do grupo do Dr. Shaw. Vale salientar mais um aspecto: As faixas de temperatura tomadas como "intermediárias" são relativas, podendo variar de rede para rede, conforme as conexões escolhidas.

O número de faixas de temperatura surge do número de todos os valores possíveis dos campos locais M_i para um dado conjunto de conexões, não podendo ser maior que este (embora possa ser menor). Como exemplo, pode-se citar as simulações com conexões 0iteste, cujos B_s "críticos" são $u^{*2/1}$, $u^{*2/2}$, $u^{*2/3}$ e $u^{*2/4}$ (os denominadores correspondem a possíveis M_s , que tornaram possíveis os resultados da tabela 4 para estas conexões).

Dois redes que possuam conexões muito semelhantes, também proporcionarão aos seus Trions valores de M_i (campos locais) muito semelhantes. A grande diferença de comportamento observada entre redes simétricas e redes com pequenas ou médias assimetrias, em B_s altos, tem uma justificativa: os valores de M_i das redes assimétricas muitas vezes são valores próximos de zero, enquanto que,

nas redes simetricas, sao exatamente iguais a zero. Em temperaturas mais baixas, estes pequenos valores podem mais facilmente sobrepujar as intransigencias minicolunares. Assim, 'a medida que a temperatura aumenta, pequenas diferencas entre conexoes mostram-se mais influentes. Os Resultados em 4.2.1 podem ser melhor compreendidos desta forma.

O "efeito domino", que vimos em redes assimetricas, viria do predominio, em valor, das aferencias de um dos lados sobre o outro. Ocorreriam tambem a partir de um determinado valor de B, na qual as diferencas de simetria ja' se fizessem relevantes. O tamanho dos MPs (numero de passos de tempo do ciclo) relaciona-se de forma obvia com o numero de Trions existentes em cada coluna: quanto mais Trions, maior o numero de Trions que o "trem" de atividade deve percorrer ate' voltar ao mesmo Trion, logo, maior o numero de passos necessarios, e maior o ciclo.

O fenomeno da aprendizagem, que nao estudamos aqui, tambem poderia ser abordado segundo a perspectiva do conceito de intransigencia minicolunar. Mudancas nas conexoes implicariam na mudanca das faixas de temperatura. Temperaturas criticas podem, assim, ser deslocadas, criadas ou mesmo extintas. O Repertorio de uma faixa pre-existente pode ter suas caracteristicas alteradas: numero e tamanho dos MPs, numero de zeros, bacias de atraccao, probabilidades de ciclagem, medias dos tempos de relaxamento, energia media dos MPs.

Em nossa opiniao, a associacao matematica do conceito de tem-

peratura 'a liberacao espontanea de neurotransmissores nas fendas sinapticas, proposta inicialmente por Shaw e Vasudevan (1974), em muito podera' contribuir ao progresso das Neurociencias. O possivel papel de neuromoduladores (variando a "temperatura") na determinacao do repertorio de comportamentos das redes neurais biologicas, no que concerne a sua riqueza de repertorio (comportamento), deveria, por conseguinte, a merecer maior atencao dos neurocientistas no futuro.

Um outro aspecto a considerar, seria a influencia da proximidade 'a temperatura de transicao de fase nas probabilidades de ciclagem (o que observarmos apenas superficialmente em nosso trabalho). As probabilidades de ciclagem estariam relacionadas com os tempos medios de permanencia de cada MP, na atividade de uma rede que evoluisse pelo Modo Montecarlo (quanto maior a PC de um MP, mais provavelmente ele se repetira' em um novo ciclo); nao estudamos isso, contudo. Se considerarmos que um MP traz dentro de si uma determinada informacao, esta informacao estara' disponivel 'a rede, enquanto o MP estiver sucessivamente se repetindo. Assim, uma rede no Modo Analitico (que tem PCs proximos de 1, segundo Shaw et al., 1988), possibilitaria a permanencia de seus MPs, por um razoavel periodo de tempo. Poderia ser, entao, associada, no ambito biologico, 'a manutencao de um determinado pensamento ou recordacao, por um razoavel periodo de tempo. No caso de redes no Modo Criativo, a grande oscilacao entre MPs poderia ser associada, por exemplo, ao belo e complexo processo de criacao de uma musica (Shaw et al., 1988).

Pelos Resultados; constatou-se o enriquecimento dos MPs (complexidade intrinseca e tamanho do ciclo) e do repertorio como um todo (pelo aumento do numero de MPs diferentes), quando usarmos dois passos de tempo no calculo do Campo Local Mi. Por este aspecto, mesmo redes que possuam dois passos de tempo, cujas conexoes W_s sejam muito mais fracas que as conexoes V_s (como em 06.1 a 06.11teste), tem comportamento menos variado que redes cujas conexoes W_s sejam mais relevantes (como aconteceu em 07.1teste). Isto tudo reproduz integralmente varias observacoes basicas de Shaw e colaboradores.

A utilizacao de dois passos de tempo, ao inves de apenas um, diferenciariam as redes de Trions de outros tipos de modelo quanto a abordagem "energetica" de suas evolucoes (dentro da definicao de "Energia" aqui adotada), juntamente com o emprego de conexoes estruturadas, que Shaw aproveitou a partir de sugestoes do modelo ANNNI.

Em redes de Campo Local calculado com um passo de tempo apenas, e em sincronismo de atividade, haverá tendencia a diminuicao energetica a cada passo de tempo, ate chegar-se ao MP. A partir dai, os valores energeticos da rede nao variarao no tempo, mesmo que o MP tenha ciclo diferente de um. Ou seja, cada um dos componentes temporais do padrao sera energeticamente equivalente ao outro.

Com a utilizacao de $NPS=2$, este fato nao mais ocorre, pois dentro de um MP pode haver passos de tempo com maior conteudo

energetico que outros. Logo, a rede nao alcanca um MP segundo uma perspectiva momentanea (de um passo de tempo) de menores conteudos energeticos: o estado da rede nao depende mais apenas do passo imediatamente anterior. Evolui sim para valores energeticos medios menores, em uma perspectiva de tempo maior. Como consequencia, surgem os complexos padroes espaco-temporais de atividade mais complexa.

Infelizmente os Resultados deste trabalho nao permitiram uma analise desta abordagem energetica com mais profundidade, porque, alem de serem observacoes preliminares e qualitativas, estas foram executados no Modo Determinista. Porem, existem algumas evidencias a favor da mesma, que ousamos desenvolver preliminarmente:

- a matriz de correlacao, anteriormente descrita quando definimos "energia", e' uma otimizacao de reducao energetica de um MP, segundo alteracoes das conexoes da rede. Logo, uma aprendizagem consistiria da reducao do conteudo energetico de um MP em relacao aos padroes mais proximos;

- MPs de pequenos valores em modulo foram encontrados com frequencia cada vez menor em Bs elevados (temperaturas baixas). Pode-se relacionar este fato a diminuicao do numero de zeros, a medida que a temperatura e' baixada. Deve-se lembrar, ainda, que a temperatura favorece o aumento de entropia da rede, tornando possivel a presenca de padroes de maior conteudo energetico;

houve uma razoavel correlacao entre os menores conteudos

energeticos dos MPs, dentro de um mesmo repertorio, e os maiores numeros de ocorrencias e as maiores probabilidades de ciclagem, como observado pelos resultados (item 4.11.6 . Este fato seria previsivel, em acordo com a nocao inicialmente proposta por Cragg e Temperlay (1954), na qual a sucessao de estados de uma rede neural esta associada ao conteudo energetico dos mesmos, segundo uma expressao semelhante a distribuicao de Boltzmann (isto e', menores energias proporcionam maior probabilidade de ocorrencia).

Uma das mais importantes consideracoes teoricas do modelo e' a necessidade de que a atividade de todas as unidades, no caso os Trions, esteja sincronizada de modo a permitir a ocorrencia de complexos padroes-espaco temporais. As colunas, por sua vez, atualizar-se-iam tambem de forma sincronizada, permitindo o processamento em paralelo de informacoes, em niveis superiores de organizacao. A nocao de processamento em paralelo pelo SNC seria, formalizada desta forma pelo modelo.

Pode-se dizer que o principio de Mountcastle (e por conseguinte o Modelo do Trion) atende ao proposto por Kauffman (1991), no que concerne a sistemas metaestaveis que se autoorganizam: possuir caracteristicas de processamento que lhes situam intermedia-riamente entre sistemas altamente ordenados e sistemas caoticos. No caso, estas caracteristicas sao atendidas pela conectividade estruturada proposta. Como resultado, ficamos entre entre o pequeno tempo de relaxamento alcancado por um sistema altamente ordenado (porem de pequena riqueza de comportamento e alta sujeicao ao acumulo de entropia) e a grande riqueza de comporta-

mento de um sistema caotico (porem de alta susceptibilidade a fatores externos e longo tempo de relaxamento). Esta situacao optima confere aos seus portadores, portanto, grande adaptabilidade no processo de selecao natural, o que nao deve ocorrer com redes sem conectividade estruturada.

* * *

Por fim, facamos alguma consideracoes sobre as implicacoes biologicas de nossas observacoes. Segundo o modelo do Trion, uma rede ingenua iniciaria suas "experiencias" com grande repertorio de estados (respostas) possiveis e com conexoes simetricas. Poderia ser, por exemplo, o cerebro de um recém-nascido, com grande plasticidade, mas nenhuma experiencia e poucas atitudes objetivas. A medida que esta rede convivesse com uma serie de estímulos, tenderia a alterar seus parametros (conexoes e temperatura), de forma a otimizar suas respostas (diminuindo ainda o seu repertorio). Da mesma forma que ganha em especializacao, perde em plasticidade. As diferencas do comportamento, entre redes simetricas e as redes assimetricas, no Modelo do Trion, talvez sejam uma previsao teorica deste fenomeno. O maior tempo de relaxamento das redes assimetricas se deveria ao seu processamento mais seletivo: uma atitude mais seletiva requereria maior tempo de elaboracao. O processo de adaptacao da rede se daria, por exemplo, por alteracoes hebbianas nas conexoes, uma expressao do Selecionismo de Edelman. A acao de substancias endogenas neuromoduladoras regularia a "temperatura" da rede neural biologica, conferindo-lhe grande plasticidade e riqueza de comportamento.

Mas tudo isso são voos muito altos e precoces. Ainda é muito cedo para querer que um modelo, por mais realista e completo que seja, consiga explicar os fenômenos mais complexos realizados pelo cérebro dos mamíferos superiores. Modelos matemáticos, como dito anteriormente, cumprem o importante papel de promover uma maior formalização das teorias científicas, auxiliando na construção de novos conceitos e na formulação de teorias abrangentes e preditivas. É o que faz o Modelo do Trion, que incorpora o Princípio de Mountcastle, além de outros conceitos biológicos importantes, como o Selecionismo de Edelman, sinapses hebbianas, etc.

As teorias científicas são, em geral, descrições deliberadamente simplificadas da realidade. Estas simplificações muitas vezes permitem a utilização de analogias, as quais não seriam muito úteis caso fossem formuladas com maior detalhamento. A falta de isomorfismo do modelo teórico com a realidade restringe, porém, o seu universo descritivo. Este é o preço da modelização. Felizmente, esta parece ser uma via frutífera de investigação, e o preço seria razoável.

Nunca é demais lembrar que simulações computacionais, por melhores e mais "realistas" que sejam, jamais substituirão a experimentação real, empírica, especialmente os estudos comportamentais que empreguem animais de laboratório. A busca das leis que regem os fenômenos biológicos, inclusive aqueles mais complexos, como o funcionamento da mente humana, é um longo caminho no qual experimentação e modelização teórica terão de andar jun-

tas.

6. CONCLUSOES

6.1. Efeitos da variacao da Temperatura

- As Probabilidades de Ciclagem (PCs) variaram de forma diferente conforme o tipo de estrutura do MP;
- O Numero de Zeros geralmente diminuiu com a diminuicao da Temperatura;
- O Numero de MPs nos Repertorios e' grande apenas em faixas de temperatura consideradas "intermediarias", sendo reduzido nos extremos inferior e superior de temperatura;
- A "Energia" media dos MPs tende a ser menor, quanto menor a Temperatura; tambem aumenta o numero de MPs no repertorio cuja energia e' baixa em relacao aos de alta;

6.2. Efeitos da variacao nos valores das Conexoes

- O Tempo de Relaxamento foi geralmente maior em redes de Conexoes Assimetricas que em redes de Conexoes Simetricas;
- A Assimetria das Conexoes geralmente promoveu uma diminuicao no numero de MPs dos repertorios;
- A Assimetria das Conexoes tendeu a diminuir o tamanho (ciclo) dos MPs;
- Quanto maior a Assimetria, menor o B em que se manifestam variacoes mais complexas no Tempo de Relaxamento, numero de MPs, tamanho dos ciclos e numero de zeros;
- O Tempo de Relaxamento e' muito menor se o calculo do Campo

Local Mi foi feito considerando apenas um passo de tempo, em relação aos casos em que são utilizados dois passos de tempo;

6.3. Efeitos sobre a "Energia" média dos MPs

- MPs de menor valor de "energia" média tendem a ocorrer com mais frequência nos repertórios;
- MPs de menor valor de "energia" média tendem ter maior probabilidade de ciclagem que os MPs de maior "energia" média;
- Em temperaturas menores (B maiores), geralmente é menor a ocorrência de MPs de alta "energia" média.

7 - BIBLIOGRAFIA

Amit, D.J.J. Modeling Brain Function: The World of Attractor Neural networks. Cambridge, Cambridge University Press, 1990.

Cingolani, H.E. & Houssay, B.A. Fisiologia Humana: Neurofisiologia. Buenos Aires, Al Ateneo: 153-154, 1989.

Kauffmann, S.A. Anthicacos and Adaptation. Scientific American, agosto de 1991 p. 78-84.

Kirkpatrick, S.; Gelatt, Jr., C.D.; Vecchi, M. P. Optimization by Simulated Annealing. Science, v.220, n. 4598, 671-680, 1983.

Leng, X.; McGrann, J.V.; Quillfeldt, J.A.; Shaw, G.L & Shenoy, K.V. Learning and Memory Processes and the Modularity of the Brain. Neural Bases of Learning and Memory, 1992.

McGrann, J.V.; Shaw, G.L. & Silverman, D. Higher Temperature Phases of a Structered Neural Model of Cortex. Physical Review A : v.43, n.10 p. 5678-5682, 1991.

North, G. A Celebration of Connectionism. Nature, v. 328, n.9 p. 107-108, 1987.

Siegel, G.J et al. Basic Neurochemistry: Molecular, Cellular, and Medical Aspects. 4a. ed. Nova Iorque. Raven Press Ltda. p.

496-505, 1989.

Shaw, G.L. & Vasudevan, R. Persistent states of neural networks and the random nature of synaptic transmission.

Math. Biosci., 21: 207-18, 1974.

Shaw, G.L.; Silverman, D.J. & Pearson, J.C. Trion Model of Cortical Organization and the Search for the Code

of Short-Term Memory and of Information Processing.

Systems with Learning and Memory Abilities, 1988.

Stein, D.L.. Spin Glasses. Scientific American, julho de 1986, p. 36-42.

Toulouse, G. Perspectives on Neural Network Models and their Relevance to Neurobiology. J.Phys A: Math. Gen. 22 : 1959-1968, 1989.

Wilson, H.R. & Cowan, J.D. Excitatory and Inhibitory Interactions in Localized Populations of Model Neurons. Biophysical Journal, 12: 1-21, 1972.