

UMA LEITURA INTRODUTÓRIA AO PARADIGMA CONEXIONISTA

*Rosângela Gabriel**

RESUMO

Este texto constitui uma leitura introdutória ao paradigma conexionista. Como os modelos conexionistas propõem-se a simular o processamento da informação ao estilo do cérebro, é necessário um conhecimento básico sobre a forma como o cérebro funciona. O cérebro, o mais complexo sistema inteligente conhecido, é o tema de parte deste artigo. Na seqüência, são descritas duas simulações do comportamento lingüístico humano a fim de ilustrar o tipo de investigação a que a abordagem conexionista se propõe. Por fim, são destacadas algumas contribuições da abordagem conexionista na investigação dos aspectos cognitivos da linguagem.

Palavras-chave: conexionismo, redes neuronais, processamento da linguagem, cognição.

ABSTRACT

This text aims to be an introductory reading to the connectionist paradigm. Since the connectionist models attempt to simulate information processing in the brain, it is necessary some basic knowledge about the way the brain works. The brain, the most complex intelligent system known, is the subject of part of this article. In the sequence, two simulations of the linguistic human behavior are described in order to illustrate the type of investigation the connectionist approach is seeking to do. Finally, a few contributions of the connectionist approach in the investigation of cognitive aspects of language are emphasized.

Keywords: connectionism, neural networks, language processing, cognition.

* Doutora em Letras pela PUCRS e professora do Departamento de Letras da UNISC. E-mail para contato: rgabriel@unisc.br.

1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade grega, assistimos a uma queda de braço entre abordagens racionalistas e empiristas. A Linguística e os estudos sobre aquisição da linguagem não ficaram imunes a essas divergências. Nos anos 60, Chomsky propôs a existência de um mecanismo de aquisição da linguagem (*Language Acquisition Device*) que pressupunha a existência de uma gramática universal (GU) inata. O principal argumento da teoria chomskiana para a necessidade de uma gramática universal é a pobreza do estímulo, ou seja, a linguagem à qual a criança tem acesso é incompleta, é um subconjunto do possível, e apresenta-se com falhas, reformulações, apagamentos.

Nos anos 70, introduziu-se o conhecimento cognitivo e social como um sistema de apoio ao processo de aquisição da linguagem, surgindo abordagens que buscavam estudar os aspectos da interação e motivação presentes no decorrer da aprendizagem de uma língua.

Na década de 80, houve um amadurecimento da preocupação com as diferenças individuais e abordagens translingüísticas da aquisição, mas o problema da aprendizibilidade permaneceu.

Por último, no final da década de 80 e especialmente na década de 90, os avanços na área da computação e da neurologia forneceram argumentos e instrumentos para o surgimento de abordagens conexionistas. Obviamente, o conexionismo não pretende resolver o impasse histórico entre abordagens racionalistas e empiristas. O que o conexionismo se propõe a fazer é oferecer ferramentas novas e úteis para levar adiante o debate, esperando que isso ocorra de forma construtiva.

Se formos buscar o trabalho mais citado dentro da abordagem conexionista, provavelmente encontraremos o modelo de Rumelhart e McClelland (1986) sobre a aquisição da morfologia verbal do inglês (maiores detalhes na seção 3.1). De fato, Rumelhart e McClelland (1986) ofereceram uma alternativa para a crença de que a aquisição do sistema flexional estava baseada em regras. A mudança mais fundamental no raciocínio, e que causou grande impacto, diz respeito à pobreza do estímulo. Os racionalistas baseiam suas explicações no fato de o estímulo do meio ser pobre para explicar as estruturas específicas de conhecimento associadas ao usuário maduro da linguagem. Informações na forma de estruturas e processos inatos seriam indispensáveis para orientar a criança no processo de aquisição. O modelo de R&M mostrou que uma simulação em computador foi capaz de aprender a morfologia verbal do inglês sem necessitar dessas informações prévias. Portanto, se uma simulação em

computador dispensa o uso de regras, por que o ser humano necessitaria desse dispositivo inato?

Já que o conexionismo apresenta argumentos contra o pressuposto racionalista da pobreza do *input*¹, pode parecer que ele se encaixa confortavelmente na visão empirista. A realidade não é necessariamente essa. O conexionismo examina o meio-termo entre o papel do *input* e o papel das estruturas e processos pré-adaptados no desenvolvimento. As arquiteturas e algoritmos de aprendizagem dos próprios sistemas conexionistas permitem a sensibilidade aos parâmetros do *input*. O conexionismo é uma ferramenta útil para explorar tanto explicações interacionistas quanto inatistas da aquisição da linguagem.

Os modelos tradicionais em Inteligência Artificial necessitavam de dois mecanismos para explicar a aquisição do pretérito simples do inglês pelas crianças: um mecanismo de armazenamento de memória e um sistema de regras de produção das formas regulares e irregulares. O modelo de Rumelhart e McClelland (1986), ao contrário, presume que um único mecanismo faz o trabalho de aprender as formas regulares e irregulares do pretérito simples. No modelo de rota simples, uma única camada conecta diretamente formas de *input* e *output*², dispensando o sistema de regras.

Outros aspectos da aquisição da linguagem vêm sendo explorados por abordagens conexionistas. A questão da formação de conceitos e do desenvolvimento do vocabulário tem recebido substanciais contribuições da pesquisa conexionista. Ao contrário de alguns teóricos da cognição, que acreditam que o desenvolvimento de habilidades cognitivas é anterior à compreensão e produção de determinadas estruturas lingüísticas, o conexionismo está mostrando que uma explicação interacional, do tipo proposto por Vygotsky, é mais adequada. De acordo com pesquisas neurológicas e com simulações conexionistas, a aprendizagem estimula o desenvolvimento de habilidades cognitivas, que por sua vez levam a novas aprendizagens e assim por diante, constituindo-se num processo iterativo, em que a plasticidade do cérebro e a experiência atuam de forma decisiva.

Também a aquisição da sintaxe vem sendo investigada. Um dos argumentos mais persuasivos de Chomsky (1959) concentra-se na observação de que os fenômenos de concordância gramatical em frases são ativados por elementos constituintes que estão estruturalmente relacionados, mas temporalmente distan-

¹ A palavra *input* pode ser traduzida por 'entrada' ou 'estímulo'. Utilizaremos, neste artigo, a palavra em inglês por tratar-se de um termo técnico das Ciências Cognitivas.

² A palavra *output* pode ser traduzida por 'resposta' ou 'saída'. Trata-se também de um termo técnico e por isso manteremos a versão em inglês.

tes entre si. Fodor e Pylyshyn (1988) defendem o Princípio da Composicionalidade, postulando que seqüências ordenadas têm de ter a estrutura preservada na forma de subestruturas explícitas a fim de que seus valores de verdade associados possam ser recuperados no processo.

Contradizendo esse raciocínio, Plunkett (1995) examina a capacidade de redes recorrentes, concebidas numa perspectiva conexionista, extrair informações estruturais de elementos seqüencialmente ordenados. Além disso, o autor descreve as condições sob as quais as redes recorrentes são capazes de extrair uma estrutura seqüencial de um *input* ordenado e o modo como essas informações são representadas nas redes conexionistas.

É óbvio que os modelos conexionistas têm um apelo neurológico. Conexionistas do *Parallel Distributed Processing Research Group* batizaram sua abordagem de *processamento ao estilo do cérebro*. Mas o conexionismo não se limita a fornecer modelos num nível neurológico. Os modelos conexionistas podem preencher uma lacuna existente entre a abordagem puramente neurológica e a abordagem simbólica. As abordagens simbólicas parecem não possuir algumas características necessárias no nível cognitivo de funcionamento: o processamento em paralelo, a degradação harmoniosa, a aprendizagem.

Este trabalho pretende ser uma introdução ao paradigma conexionista. Como os modelos conexionistas se propõem a simular o processamento da informação ao estilo do cérebro, é necessário um conhecimento básico sobre a forma como o cérebro funciona. Por isso, dedicamos a seção 2 à revisão dos estudos realizados sobre o cérebro, o sistema inteligente mais complexo que conhecemos. Já a seção 3 trará exemplos de simulações implementadas sob uma perspectiva conexionista, seus avanços e suas limitações. A quarta seção discorrerá sobre contribuições que o paradigma conexionista vem trazendo para a compreensão dos aspectos cognitivos da linguagem.

2 UM SISTEMA INTELIGENTE: o cérebro

O título desta seção encerra vários pontos para discussão: não seria mais apropriado dizer "O sistema inteligente"? Se o cérebro não é "o sistema inteligente", que outros sistemas o são? Podemos considerar um computador ou um robô como sendo sistemas inteligentes? E ainda, o que é um sistema inteligente? O que é inteligência?

Obviamente não temos a presunção de apresentar uma resposta definitiva a essas questões, mas gostaríamos de trazer alguns elementos para discussão.

Começemos pela última questão. Dubois (1994) diz que a *inteligência é*

como um *prisma de numerosas faces*. Para o autor, não se trata de uma qualidade própria das condutas humanas, mas sim de uma função auto-organizadora de comportamentos que se desenvolvem e evoluem. Qualquer outro sistema, na opinião de Dubois, seja ele natural ou artificial, poderia engendrar comportamentos inteligentes.

Gardner (1994) conceitua inteligência como

um conjunto de habilidades de resolução de problemas - capacitando o indivíduo a resolver problemas ou dificuldades genuínos que ele encontra e, quando adequado, a criar um produto eficaz - e deve também apresentar o potencial para encontrar ou criar problemas - por meio disso propiciando o lastro para a aquisição de conhecimento novo.

O autor, em sua concepção de inteligência, privilegia a questão da habilidade (*know-how*) em detrimento do conhecimento proposicional (*know-that*) que, segundo ele, só é valorizado em algumas culturas.

Sem querer esgotar essa questão, parece que o conceito de inteligência prevê a capacidade de responder adequadamente aos problemas. E, além disso, a inteligência é a responsável pela auto-organização da informação e do comportamento, a fim de obter respostas mais rápidas e apropriadas aos estímulos.

M. Minsky, criador da inteligência artificial, e A. Turing, o criador da máquina de Turing, tomam como padrão a inteligência humana. M. Minsky (1985) explica que "uma máquina é inteligente a partir do momento em que consegue realizar tarefas que seriam consideradas inteligentes se fossem realizadas por homens"³. Dubois (1994) discorda dessa posição antropomórfica e define inteligência como "uma propriedade dos sistemas designados por sistemas inteligentes, o cérebro, por exemplo". Um sistema inteligente deve estar em contínua evolução e tornar-se cada vez mais complexo. Suas características devem ser a capacidade de invenção, a criatividade, a capacidade de adaptação, a capacidade de resolução de problemas, a capacidade de armazenar informações para utilizá-las em face de situações velhas e novas. O objetivo de um sistema inteligente é "reconstruir a (ou as) melhor(es) representação(ões) do seu meio e de si próprio, a fim de adquirir o máximo de autonomia e de ser o menos possível sensível às flutuações deste último" (DUBOIS, 1994). Para alcançar esse objetivo é fundamental que o sistema seja capaz de **aprender**, ou seja, seja capaz de criar novas representações.

³ As traduções dos originais em inglês são de responsabilidade da autora.

Diante dessas posições, preferimos um conceito de sistema inteligente em que o cérebro seja um dos sistemas possíveis (provavelmente o mais completo e o mais complexo). Dedicaremos o restante desta seção a uma breve síntese do que se sabe até o momento sobre o complexo sistema que é o cérebro, sua arquitetura, seu funcionamento e seus mistérios.

2.1 O suporte material

O sistema nervoso é único pela vasta complexidade de ações que pode controlar. Ele recebe literalmente milhões de *bits* de informação de diferentes órgãos sensoriais e integra-os para determinar a resposta que deve ser dada pelo corpo. A unidade funcional básica desse sistema é o neurônio.

O sistema nervoso central é composto por mais de 100 bilhões de neurônios (GUYTON e HALL, 1996). O neurônio é caracterizado pela riqueza extraordinária de seus prolongamentos, os dendritos e o axônio. A função do neurônio parece estar diretamente ligada a sua arquitetura espacial. Os dendritos repartem-se em múltiplos ramos, cuja arborescência ocupa um espaço muito grande. Cada dendrito de um mesmo neurônio tem a sua própria geometria e se projeta em zonas diferentes. Já o axônio emerge do corpo celular, percorre um caminho mais ou menos longo até terminar em múltiplas ramificações.

Os sinais de *input* entram no neurônio através de sinapses dos dendritos ou corpo celular. Cada neurônio pode ter algumas centenas ou mais de 200.000 conexões sinápticas. Por outro lado, o sinal de *output* deixa o neurônio por um único caminho, o axônio, que tem muitos ramos direcionados para outras partes do sistema nervoso ou corpo periférico. A Figura 1 mostra um neurônio típico do córtex motor.

A propriedade característica do neurônio é a excitabilidade de sua membrana. Ela permite gerar e propagar um sinal elétrico, chamado potencial de ação, cuja única variação é a frequência. Quando o potencial de ação chega ao terminal nervoso, a informação elétrica é traduzida em informação química, em pontos de contato chamados sinapses. A sinapse é o local onde a membrana elétrica é convertida em mensagem química. Discutiremos mais detalhadamente o funcionamento das sinapses na seção 2.3.

O suporte material do cérebro, constituído de neurônios e sinapses, é ainda dividido em áreas. Cada área do cérebro possui seu papel específico. As regiões mais baixas preocupam-se primeiramente com respostas motoras automáticas e instantâneas do corpo para o estímulo sensorial, como os reflexos, e as regiões mais altas com movimentos deliberados controlados pelo processo de pensamento do cerebelo.

O sistema nervoso tem características específicas de cada estágio do desenvolvimento evolutivo. Três grandes níveis têm atribuições funcionais específicas:

a. Nível da medula espinhal ou arqueocórtex - assegura as relações com o meio e a adaptação. É responsável por conduzir sinais das periferias do corpo para o cérebro, bem como conduzir sinais do cérebro para a periferia. Coordena os movimentos para atividades motoras, tais como caminhar ou andar de bicicleta. É responsável por acionar os reflexos de proteção, a fim de evitar objetos que causam dor, ou ainda os reflexos dos movimentos gástricos.

b. Nível cerebral mais baixo ou paleocórtex - é responsável por controlar as atividades subconscientes ou inconscientes, tais como a salivação. É onde se situam as emoções elementares (medo, fome), os padrões emocionais tais como raiva, excitação sexual, reação à dor, e ainda certos tipos de memória, o olfato e outros instintos básicos.

c. Nível cerebral mais alto, nível cortical ou neocórtex - representa cerca de 85% da massa cerebral. É responsável pelo armazenamento da memória. O córtex não funciona sozinho, mas sempre associado com os centros inferiores do sistema nervoso, pois é capaz de fazer associações complexas entre as informações sensoriais e recordações de experiências passadas. É essencial para a maioria dos nossos processos de pensamento.

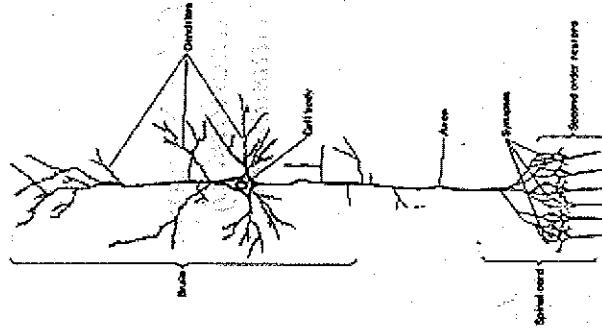


FIGURA 1 - Estrutura de um grande neurônio do cérebro, mostrando suas partes funcionais mais importante (GUYTON e HALL, 1996).

Os centros inferiores do cérebro despertam o córtex, que abre seu banco de memória para o mecanismo do pensamento. Através de uma simbiose com os níveis inferiores, o homem comunica-se com o meio e torna-se capaz de fazer generalizações, compreender raciocínios abstratos, inventar e fazer uso da linguagem. Cada porção do sistema nervoso desempenha funções específicas. Mas é o córtex que abre o mundo para a mente.

A estrutura anatômica do cérebro é particularmente complexa. Vimos até agora que o cérebro é composto por bilhões de neurônios, interligados por meio de infinitas sinapses, sendo ainda dividido em áreas evolutivas com funções específicas. Além dessa divisão evolutiva, que se dá num eixo vertical, o cérebro é dividido em dois hemisférios. A parte exterior dos dois hemisférios é constituída por uma camada plissada de matéria cinzenta (o córtex), cujas circunvoluções e sulcos profundos ocultam os nove décimos da superfície que se dividem em cinco lobos. Isso equivale a dizer que, se fosse possível "esticar" a camada cinzenta, ela ocuparia nove vezes a superfície que ocupa ou o equivalente a uma fronha de travesseiro. Parece que a camada cinzenta foi "amassada" para ocupar apenas o espaço restrito permitido pelo crânio, sem perder sua capacidade de armazenar informação.

Há dois tipos de tecido no cérebro. Por um lado, a popular "massa cinzenta", e por outro, a substância branca, que correspondem a duas partes da célula nervosa, o corpo celular e seu prolongamento axonal. A substância cinzenta constitui a camada mais externa do cérebro, ao passo que a substância branca localiza-se na camada mais interna.

A Figura 1 mostra um neurônio típico do córtex motor. Contudo, esse é apenas um tipo de neurônio. No cérebro há vários tipos morfológicos de neurônios, desde os grandes neurônios motores até as pequenas células sensoriais, cuja função é de transmissão e de regulação, também chamadas de funções interneuronais. Os neurônios em outras partes da medula e do cérebro diferem do neurônio apresentado na Figura 1 em alguns aspectos: tamanho do corpo celular; comprimento, tamanho e número de dendritos, variando de nove a muitos centímetros; o comprimento e tamanho do axônio; o número de terminais pré-sinápticos, que podem ser apenas alguns e podem também chegar a mais ou menos 200.000. Essas diferenças fazem neurônios em diferentes partes do sistema nervoso reagir diferentemente aos sinais e, portanto, desempenhar diferentes funções. A diferença fundamental desses tecidos nervosos em relação aos outros tecidos de todos os sistemas vivos é que eles não se regeneram. Assim, o fato antes do nascimento possui um número de neurônios superior ao do recém-nascido ou ao do adulto.

É importante ressaltar que, apesar de o número de neurônios só diminuir

durante e após o nascimento, a substância branca, ou seja, os dendritos e axônios, desenvolve-se extraordinariamente a partir do nascimento. O cérebro de um adulto pesa em torno de 1.300 gramas, ao passo que o de um bebê pesa em média 400 gramas.

2.2 A arquitetura neuronal

A organização cerebral é um tema bastante polêmico entre os estudiosos do cérebro. Howard Gardner (1994) afirma haver "um emergente consenso sobre a localização cerebral" e utiliza o "isolamento potencial por dano cerebral" como um dos critérios fundamentais para nomear um conjunto de inteligências, em sua *Teoria das Inteligências Múltiplas*.

Ao contrário da otimista visão de Gardner, não é esse emergente consenso que aflora de nossos estudos. Ao contrário, parece que a visão localizacionista, defendida por Gardner, vem sendo bombardeada a cada novo relatório de pesquisa sobre o cérebro. O inter-relacionamento de todas as regiões do cérebro, possível graças à arquitetura espacial dos neurônios, aponta para a existência de uma arquitetura dinâmica.

Luria, de acordo com Vygotsky (1993), trabalha com a noção de **função** como um sistema disperso pelo cérebro e contendo vários níveis. A noção de função explica: (a) a ruptura de uma dada função como o resultado de uma lesão focal em diferentes áreas do córtex; e (b) a ruptura de um conjunto de funções não-relacionadas aparentemente, que se segue a uma lesão em áreas corticais circunscritas.

Ao nível cortical, as capacidades cognitivas passam a ser analisadas e distribuídas por um sistema de zonas ou centros de trabalho sincronizado, zonas essas diferenciadas anatômica e funcionalmente. Cada zona tem, por consequência, uma contribuição única para a organização geral, sugerindo que qualquer função cerebral tem uma localização dinâmica e não uma localização restrita e estática.

O ser humano tem uma característica peculiar e original no reino animal: nasce com um cérebro imaturo e inconcluso. Só alguns processos, como os reflexos, estão presentes no recém-nascido; outros processos dependem da estimulação e do auxílio do meio. A atividade cognitiva complexa, que se trate de psicomotricidade ou de aprendizagens simbólicas, envolve sempre sistemas de zonas de trabalho simultâneo, zonas essas inexistentes no momento do nascimento.

A maturação do cérebro, como sistema dinâmico que é, forma-se a partir da influência decisiva do meio envolvente. Sem essa influência determinante, de

onde decorre a mediação e a ontogênese da linguagem, a criança não desenvolve o seu cérebro nas suas funções psíquicas superiores. Sem essas funções, não se pode apropriar-se da história humana, e por isso não organiza o seu comportamento nem o seu cérebro, podendo mesmo vir a comportar-se como uma criança-loba.

Para Lúria, os sistemas de trabalho simultâneo estão na base da ontogênese da cognição. Cada aquisição cognitiva da criança (postura bípede, compreensão auditiva, fala, leitura e escrita) representa o resultado de uma constelação de centros de trabalho dispersos geograficamente no cérebro, mas em constante interação.

O cérebro é, nessa perspectiva, um sistema de zonas de co-laboração e concentração, caracterizado pela consistência e estabilidade de suas interações e pela variedade e plasticidade de seus componentes, bem como pelos diferentes estágios de desenvolvimento que assume no tempo. Por isso, o padrão de organização cerebral muda com o tempo e com a experiência. Assim, a mesma lesão é diferente na criança e no adulto, porque ambos se encontram integrados em diferentes padrões de organização interna e funcional.

Quanto ao problema da lateralização, Lúria não se limita à especialização hemisférica, ele procura antes diferenciar a contribuição específica de cada hemisfério para a realização de processos psíquicos superiores. Quando se trata desses processos superiores, a interação funcional dos dois hemisférios é indispensável. Porém, o autor não deixa de argumentar que a lesão em cada um dos hemisférios tem efeitos distintos, afetando a função de forma diferente.

De fato, Lúria parece estar certo quando afirma que cada hemisfério contribui de uma forma específica nos processos psíquicos superiores. Em certos epilepticos graves, pratica-se uma intervenção cirúrgica que consiste em seccionar o corpo caloso, ou seja, as fibras nervosas que unem um ao outro os dois hemisférios do cérebro. O efeito é a total incapacidade de comunicação entre os dois hemisférios, o que permite conhecer melhor as funções de cada um deles.

Aparentemente, as pessoas sujeitas a esse tipo de cirurgia têm um comportamento normal, mas algumas investigações mostraram uma incapacidade de integração das informações fornecidas pelo meio. Dubois (1994) traz o exemplo de um sujeito ao qual se mostrou a palavra "cavalo". Quando questionado sobre o que viu, o sujeito afirmou não ter visto nada. Porém, quando lhe foi pedido que desenhasse a palavra, ele desenhou os contornos do animal, com precisão, afirmando: "É absurdo, não vi nada".

O hemisfério esquerdo sabe como manipular objetos, mas não sabe por quê. Enquanto o hemisfério direito usa critérios globais para selecionar objetos, o hemisfério esquerdo usa critérios baseados no cálculo. O hemisfério esquerdo

é responsável pela consciência psicológica objetiva, pela capacidade de referir-se ao espaço e ao tempo objetivo; é responsável ainda pela capacidade lógico-matemática, pela estrutura mental-musical e pela linguagem, incluindo a percepção da fala e dos processos e estruturas da leitura. Portanto, todas as atividades que exigem um raciocínio seqüencial são comandadas pelo hemisfério esquerdo.

Já o hemisfério direito é responsável pela apreensão global e subjetiva do mundo. A capacidade de fazer relações entre fatos aparentemente desconexos, a capacidade de se referir ao espaço subjetivo dos acontecimentos da sua própria vida, a irresponsabilidade e também a liberdade e a criatividade são atribuições do hemisfério direito, assim como a introspecção, a não existência do tempo objetivo e os aspectos psicológicos subjetivos.

O corpo caloso, que liga os dois hemisférios, é o canal de integração dessas diferentes apreensões do mundo, que são fundamentais nos processos psíquicos superiores, tais como a capacidade de encontrar novas soluções para os problemas, de refletir global e seqüencialmente ao mesmo tempo, de raciocinar dedutiva e intuitivamente, de recuperar conhecimento armazenado na memória e utilizá-lo numa situação presente. Toda essa integração é possível graças aos bilhões de neurônios interligados no cérebro através das sinapses, a cujo estudo nos dedicaremos a seguir.

2.3 Funcionamento neuronal: as sinapses

A sinapse é o ponto de junção de um neurônio com o próximo e, portanto, um lugar vantajoso para o controle da transmissão do sinal. As sinapses determinam a direção em que o sinal nervoso se espalhará no sistema nervoso. Algumas sinapses transmitem sinais de um neurônio para o próximo com maior facilidade, e outras transmitem os sinais com maior dificuldade. Além disso, sinais facilitadores e inibidores de outras áreas do sistema nervoso podem controlar a transmissão sináptica, às vezes abrindo as sinapses para transmissão e outras vezes fechando-as.

As sinapses desempenham uma ação seletiva, às vezes bloqueando o sinal fraco enquanto permite que o sinal forte passe, às vezes selecionando e ampliando certos sinais fracos, às vezes canalizando os sinais em várias direções no lugar de apenas uma.

Os terminais pré-sinápticos são 10.000 ou mais pequenos botões, de 80 a 95% deles presentes nos dendritos e de 5 a 20% no soma. Alguns desses terminais são excitatórios - secretam uma substância que excita o neurônio pós-sináptico; muitos outros são inibitórios - secretam uma substância que inibe o neurônio pós-sináptico.

Os estudos com microscópio eletrônico mostram que os botões sinápticos têm formatos anatômicos variados, mas a maioria lembra botões ovais ou redondos, e, portanto, são chamados botões sinápticos. A Figura 3 mostra um esquema de neurotransmissão sináptica.

O terminal pré-sináptico é separado do pós-sináptico por uma fenda sináptica tendo de 200 a 300 angströms. O terminal tem duas estruturas internas importantes: as vesículas transmissoras e as mitocôndrias. As vesículas transmissoras contêm uma substância transmissora que, quando liberada na fenda sináptica, excita ou inibe o neurônio pós-sináptico - excita se a membrana neuronal contém receptores excitatórios, inibe se ela contém receptores inibitórios.

Quando um potencial de ação se distribui sobre um terminal pré-sináptico, a despolarização da membrana causa o esvaziamento de um pequeno número de vesículas na fenda. O transmissor liberado causa uma mudança imediata na característica de permeabilidade da membrana neuronal pós-sináptica, que conduz a excitação ou inibição ao neurônio pós-sináptico, dependendo das características do receptor.

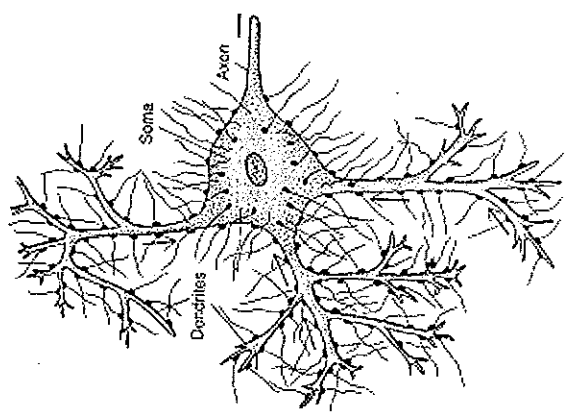


FIGURA 2 - Neurônio motor típico, mostrando terminais pré-sinápticos no soma neuronal e dendritos. Note também o axônio único. (GUYTON e HALL, 1996)

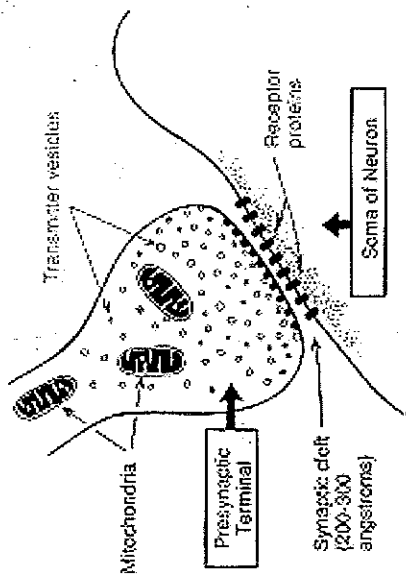


FIGURA 3 - Neurotransmissão sináptica. (GUYTON e HALL, 1996)

A membrana celular que cobre os terminais pré-sinápticos contém grande número de canais de cálcio (*voltage-gated calcium channels*). Ela é diferente das outras áreas do neurônio, que contêm poucos desses canais. Quando um potencial de ação despolariza o terminal, grande número de íons de cálcio escoam nos terminais através desses canais. A quantidade de substância transmissora que é liberada na fenda sináptica está diretamente relacionada ao número de íons de cálcio que entra no terminal. O mecanismo preciso pelo qual os íons de cálcio causam essa liberação não é conhecido.

As funções sinápticas podem ser assim descritas:

- (1) bloqueamento dos impulsos neuronais em sua transmissão de um neurônio para o próximo;
- (2) transformação dos impulsos neuronais únicos em impulsos repetidos;
- (3) integração dos impulsos neuronais com impulsos de outros neurônios para causar um intrincado padrão de impulsos em neurônios sucessivos;
- (4) estocagem da informação (= memória).

As sinapses podem ser de dois tipos: químicas e elétricas. Quase todas as sinapses usadas para transmissão de sinais são sinapses químicas. Nelas o primeiro neurônio expõe uma substância química chamada **neurotransmissor**, e sua transmissão atua nas proteínas receptoras da membrana do próximo neurônio para excitá-lo, inibi-lo ou modificar sua sensibilidade de alguma forma. Mais de quarenta substâncias transmissoras foram descobertas até agora. Já nas sinapses elétricas, canais diretos conduzem eletricidade de uma célula para a próxima. A maioria delas consiste de pequenas estruturas tubulares

de proteínas chamadas de *gap junctions* que permitem movimentos livres de íons do interior de uma célula para outra. Há poucas dessas sinapses no sistema nervoso central e ainda não se sabe seu significado e importância. Por outro lado, através das *gap junctions* são transmitidas ações potenciais de uma fibra muscular para a próxima.

Uma importante característica das sinapses químicas é que os sinais transmitidos, os **neurotransmissores**, são secretados pelo neurônio pré-sináptico para o neurônio pós-sináptico. Essa é uma característica das sinapses químicas, pois as elétricas transmitem seus sinais em todas as direções. O mecanismo de condução numa direção permite que os sinais sejam direcionados a objetivos específicos.

Muitas funções do sistema nervoso - por exemplo, o processo da memória - requerem mudanças prolongadas nos neurônios, de segundos até meses após a transmissão inicial da substância ser feita. Os canais de íons não são apropriados para causar prolongamento de mudanças neuronais pós-sinápticas porque os canais fecham dentro de milissegundos após a substância transmissora não estar presente. Em muitos exemplos, o prolongamento da ação neuronal é arquivado pela ativação de um segundo mensageiro, sistema químico dentro da própria célula neuronal pós-sináptica, que causa o efeito prolongado.

Um grupo de proteínas, chamadas *G-proteins*, atua como segundo mensageiro. O sistema do segundo mensageiro é extremamente importante para alterar as respostas características de diferentes padrões neuronais e, além disso, parece ser de suma importância para o armazenamento da informação, assunto da próxima seção.

2.4 Processamento e armazenamento da informação

A principal função do sistema nervoso é processar a informação de tal forma que ocorra uma resposta motora apropriada. Mais de 99% de todas as informações sensoriais são descartadas pelo cérebro como irrelevantes ou não importantes. Por exemplo: as partes do corpo que estão em contato com as roupas, a pressão da cadeira quando estamos sentados, etc. Quando olhamos, nossa atenção se direciona para um objeto do campo de visão e o barulho percebido ao nosso redor é usualmente relegado a segundo plano.

Após a informação sensorial importante ter sido selecionada, ela é canalizada para a região do cérebro apropriada, para causar a resposta desejada. Essa canalização da informação é chamada a **função integrativa** do sistema nervoso. Então, se uma pessoa põe a mão no fogão quente, a resposta desejada é retirar a mão. A maioria das atividades do sistema nervoso é iniciada pela

experiência sensorial que emana dos **receptores sensoriais** (visuais, auditivos, táteis, etc.). Essa experiência sensorial pode causar uma reação imediata, ou sua memória pode ser estocada na mente por minutos, semanas ou anos e então pode ajudar determinadas reações corporais no futuro. Grande parte da estocagem de informação ocorre no **córtex cerebral**, mas também as regiões básicas do cérebro e mesmo a espinha dorsal podem estocar pequenas somas de informação. Quando uma pessoa tem um membro amputado, por exemplo, mesmo depois de muito tempo, continua a "sentir" o membro como se ainda estivesse ligado ao corpo. É a memória do corpo que mantém o membro "vivo".

Como vimos na seção 2.3, o armazenamento da informação, ou seja, a memória, é uma função das sinapses. Cada vez que certo tipo de sinal sensorial passa através de uma sequência de sinapses, essas sinapses tornam-se mais capazes de transmitir o mesmo sinal na próxima vez em que esse caminho for usado, por processo chamado **facilitação**. Após os sinais sensoriais terem passado por uma sequência de sinapses um grande número de vezes, as sinapses tornam-se tão facilitadas que sinais gerados dentro do cérebro podem causar transmissão de impulsos através da mesma sequência de sinapses, mesmo que o *input* sensorial não tenha sido excitado. Isso dá à pessoa a percepção da experiência sensorial inicial, entretanto, são apenas memórias da sensação. A título de ilustração, pode-se pensar no sabor de um alimento ou na fragrância de um perfume sem que estejam presentes.

Essa capacidade de geração de sinais dentro do cérebro merece uma atenção especial. Não estaria aí a chave para a compreensão do processo de associação, de reflexão, de pensamento? Se ouvimos a palavra "moranguinho", lembramos o gosto do morango, sem termos esse *input* sensorial presente. Outros tipos de associação, num nível menos direto e óbvio, também podem ter sua explicação no processo de geração de sinais dentro do cérebro, tais como a auto-estimulação, a motivação e, por outro lado, a depressão, o desânimo. O processo de pensamento do cérebro compara novas experiências sensoriais com as armazenadas na memória; a memória ajuda a selecionar novas informações importantes e canaliza-as para as áreas de estocagem apropriadas para uso futuro ou resposta motora imediata.

Uma característica comum dos receptores sensoriais é que, independentemente do tipo de estímulo que excita o receptor, seu efeito imediato é alterar o potencial da membrana do receptor. Essa mudança no potencial é chamada um **receptor potencial**. A causa básica da mudança no potencial da membrana é uma mudança na permeabilidade, que permite aos íons se difundirem mais ou menos através da membrana. Outra característica especial de todos os receptores sensoriais é que eles adaptam-se parcialmente ou completamente ao

estímulo após um período de tempo. Há receptores que se adaptam lentamente ao estímulo e mantêm a transmissão contínua de impulsos para o cérebro enquanto o estímulo está presente (minutos ou horas). Outros receptores adaptam-se rapidamente, mas não podem ser usados para transmitir um sinal contínuo porque esses receptores são estimulados apenas quando a força do estímulo muda. Exemplo disso seria, por exemplo, a previsão do próximo movimento durante uma corrida ou uma alteração para evitar uma queda.

A transmissão dos diferentes tipos de sinais se dá através de fibras nervosas. As fibras nervosas têm entre 0.2 a 20 micrômetros de diâmetro - quanto maior o diâmetro, maior a rapidez de condução. A velocidade média de condução é entre 0.5 e 120 metros/segundo. Algumas poucas grandes fibras podem transmitir impulsos a velocidade tão alta como 120m/seg, uma distância em um segundo que é maior que um campo de futebol. Por outro lado, as fibras menores transmitem impulsos a 0.5m/seg, necessitando 2 segundos para ir do dedão do pé à medula espinhal.

A Figura 4 apresenta um esquema de um *pool* neuronal, ou seja, uma associação de sinapses, um campo onde ocorrem muitas sinapses.

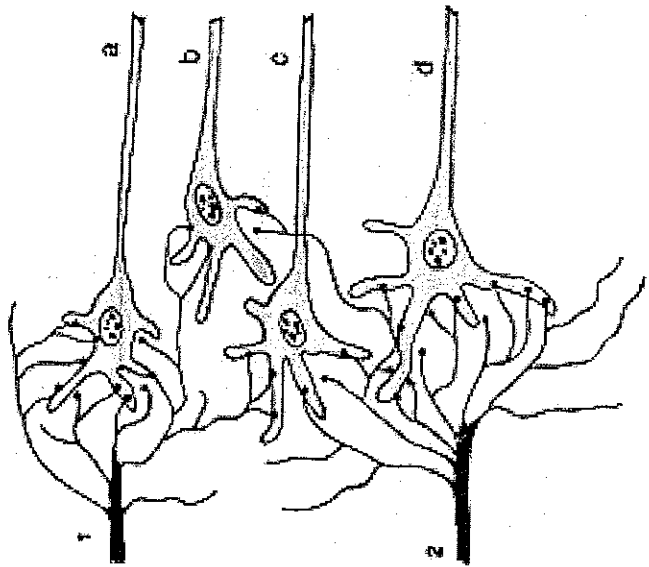


FIGURA 4 - Organização básica de um *pool* neuronal. (GUYTON e HALL, 1996)

Um *pool* pode ser uma área de estimulação, facilitação ou inibição das sinapses. Num *pool* neuronal pode haver:

(a) divergência de sinais passando através do *pool* para causar amplificação do sinal ou para transmitir o sinal a áreas separadas;

(b) convergência de sinais: *inputs* múltiplos convergem para um mesmo neurônio. Esses *inputs* podem ter uma única origem ou origens múltiplas;

(c) circuitos neuronais causando tanto sinais de *output* inibitório ou excitatório: um sinal de entrada para um *pool* causa um sinal *output* excitatório indo numa direção e, ao mesmo tempo, um inibitório indo noutra (ex.: pares de músculos antagonísticos). Esse tipo de circuito é importante na prevenção da superatividade de muitas partes do cérebro.

Um dos mais importantes de todos os circuitos do sistema nervoso é o circuito oscilatório. Tais circuitos são causados por *feedback* positivo dentro do circuito, que retorna para re-excitar o *input* do mesmo circuito. Conseqüentemente, uma vez estimulado, o circuito descarrega repetidamente por um longo tempo. A re-excitação causa o prolongamento de um sinal por um *pool* neuronal. É possível que os circuitos oscilatórios tenham um papel crucial no armazenamento da informação, por serem capazes de reforçar uma aprendizagem. Por outro lado, os circuitos neuronais podem criar um sério problema. Quase todas as partes do cérebro conectam-se direta ou indiretamente com todas as outras. Se a primeira parte excita a segunda, a segunda a terceira, a terceira a quarta e assim até finalmente a última parte re-excitar a primeira parte, está claro que um sinal excitatório que entra em qualquer parte do cérebro pode ativar um ciclo contínuo de re-excitação de todas as partes. Se isso ocorrer, o cérebro pode ser inundado por uma massa de sinais incontrolada - sinais que podem não transmitir informação, entretanto, podem estar consumindo os circuitos do cérebro de forma que nenhum sinal informacional possa ser transmitido. Esse efeito ocorre, por exemplo, durante um ataque epiléptico. O sistema nervoso central possui duas maneiras de evitar que isso ocorra: os circuitos inibitórios e a fadiga das sinapses.

Quando a excitação das sinapses é repetidamente estimulada, ocorre um fenômeno chamado **fadiga da transmissão sináptica**. A fadiga é provavelmente o aspecto mais importante para que o excesso de excitabilidade do cérebro durante um ataque epiléptico cesse. O mecanismo da fadiga é a exaustão do estoque de substâncias transmissoras nos terminais pré-sinápticos, porque a maioria dos neurônios pode estocar transmissores para apenas 10.000 transmissões sinápticas normais. O mecanismo da fadiga possibilita ajustamentos automáticos de curta duração da sensibilidade das sinapses. Os caminhos que são muito usados tornam-se facilmente fatigados e sua sensibilidade diminui. Por

outro lado, os que são pouco usados estão descansados e sua sensibilidade aumenta. Então, a fadiga e a recuperação da fadiga constituem importantes meios de curta duração de moderação da sensibilidade dos diferentes circuitos do sistema nervoso, ajudando-os a operar numa sensibilidade média que permite seu funcionamento efetivo.

Além de ajustamentos de curta duração, a sensibilidade de longa-duração das sinapses pode mudar tremendamente através do aumento ou diminuição do nível de proteínas receptoras nos *sites* sinápticos quando há superatividade ou subatividade. O mecanismo é o seguinte: as proteínas receptoras são formadas constantemente pelo sistema reticular endoplasmático e são constantemente inseridas na membrana sináptica do neurônio receptor. Entretanto, quando as sinapses são superativadas, de forma que o excesso de substância transmissora combina com a proteína receptora, muitos desses receptores são desativados permanentemente e retirados da membrana sináptica. É imprescindível que ocorra esse ajustamento da sensibilidade sináptica para o exato nível de que cada função necessita.

Quando os computadores começaram a ser desenvolvidos em várias partes do mundo, rapidamente surgiu a analogia entre as máquinas e o sistema nervoso. O primeiro ponto em comum é que os circuitos de *input* podem ser comparados aos receptores sensoriais; o segundo é que os circuitos de *output* assemelham-se à resposta motora comandada pelo cérebro. Nos computadores simples, os sinais de *output* são controlados diretamente pelos sinais de *input*, operando de forma semelhante aos reflexos simples da medula espinhal. Já nos computadores mais complexos, o *output* é determinado tanto pelos sinais de *input* quanto pelas informações armazenadas na memória.

Os computadores existentes até a presente data, ao contrário do cérebro, operam de forma seqüencial. Recentemente, um grupo de cientistas conseguiu mover partículas em estado quântico. Os computadores atuais criam informações complexas, mas apenas num sentido único e previsível. Já num computador quântico, é possível emitir vários sinais ao mesmo tempo, o que aumenta de forma exponencial a velocidade da informação, bem como a possibilidade de combinações de informações complexas. Talvez com o advento dos computadores com capacidade para o processamento em paralelo, a analogia entre computadores e o sistema nervoso seja ainda mais atraente.

3 REDES NEURONIAIS ARTIFICIAIS: as simulações

A seção anterior foi dedicada à revisão dos conhecimentos sobre o suporte neurológico da inteligência humana. Muitas dúvidas persistem pois ainda não

sabemos exatamente como comportamentos complexos, tais como a linguagem, são produzidos e armazenados. Como foi dito no final da seção, o computador pode ser comparado ao sistema nervoso em vários aspectos. Além disso, até o momento, os sistemas computacionais são os que mais se aproximam de nossa concepção de sistema inteligente (DUBOIS, 1994). Por isso, alguns estudiosos, entre eles os pesquisadores conexionistas, têm optado por simular em computador certos aspectos da cognição. Passaremos a apresentar três simulações realizadas a partir de uma visão conexionista dos processos envolvidos na aquisição e processamento da linguagem.

3.1 O modelo de Rumelhart e McClelland

O modelo clássico de Rumelhart e McClelland (1986) foi construído para testar a capacidade do computador aprender as formas regulares e irregulares do passado dos verbos do inglês. Num trabalho inicial, os pesquisadores desenvolveram um modelo de ativação interativa da percepção da palavra. O comportamento do modelo mostrou-se semelhante ao comportamento humano, já que foi capaz de distinguir letras em seqüências de letras regulares ortograficamente (seqüências de acordo com as regras do inglês) mais acuradamente do que letras em seqüências de letras irregulares. O comportamento do modelo foi legítimo, apesar de não conter regras explícitas.

No trabalho que nos interessa nesta seção, Rumelhart e McClelland (1986) pretenderam dar conta da seqüência de três estágios observada nas crianças durante o processo de aquisição do uso do tempo passado do inglês. Esses estágios podem ser assim caracterizados:

Estágio 1 => as crianças usam um pequeno número de verbos no passado. São verbos com alta freqüência de uso, sendo a maioria irregulares. Elas tendem a usar o tempo passado corretamente, mas não como a forma alterada de um verbo do presente - parece que apenas sabem um pequeno número de itens separados. Nesse estágio não há evidência do uso de regras.

Estágio 2 => as crianças usam um número muito maior de verbos no tempo passado. Os verbos regulares passam a ser maioria. Surgem evidências de que as crianças possuem um conhecimento implícito de regras linguísticas, pois são capazes de gerar o passado para uma palavra inventada. Além disso, cometem erros, tais como adicionar *ed* à raiz de um verbo irregular, ou ainda, adicionar *ed* ao passado irregular de um verbo. Por exemplo, *goed* ou *wented* para o passado do verbo *to go*, ou seja, *went*.

Estágio 3 => as crianças recuperam o uso correto de formas irregulares do passado enquanto continuam aplicando a forma regular para novas palavras.

As formas regulares e irregulares coexistem, como no falante maduro.

É importante lembrar que o processo de aquisição é gradual e que os estágios não podem ser claramente demarcados, devido à oscilação de um estágio para outro durante o período de transição. O objetivo dos autores foi simular a performance nos três estágios e captar outros aspectos da aquisição. E, ainda, mostrar que as mudanças graduais características da aquisição normal, tais como mudanças nos tipos de erros em fases posteriores do desenvolvimento, são também uma característica do modelo de processamento distribuído em paralelo.

Rumelhart e McClelland (1986) não tiveram a pretensão de produzir o processo completo de florescimento da linguagem no discurso do dia-a-dia. O objetivo foi estudar a aprendizagem do passado buscando captar as características necessárias para produzir os três estágios da aquisição e não os aspectos pragmáticos. Como tentativa de aprendizagem, pares de *inputs*, um captando a estrutura fonológica da forma raiz e outro a estrutura fonológica da versão correta do passado daquela palavra, foram apresentados ao modelo. O comportamento do modelo é observado ao se dar a forma radical (raiz) e examinar a forma de passado que ele gera como tentativa de acerto. Por exemplo, dada a forma base *work*, espera-se que a simulação gere a forma *worked*.

O modelo consiste de duas partes básicas:

- (a) uma rede simples associadora de padrões que aprende o relacionamento entre a forma base e a forma do passado (ou seja, faz as conexões em paralelo);
- (b) uma rede decodificadora que converte uma representação de traços do passado em uma representação fonológica. Toda aprendizagem ocorre no associador de padrões; a rede decodificadora é simplesmente um mecanismo para converter uma representação de traços, que pode ser uma falha em relação ao padrão fonológico, em uma representação fonológica legítima (correta).

O associador de padrões contém uma conexão modificável ligando cada unidade de *input* a cada unidade de *output*. Inicialmente, essas conexões partem do zero (nulo), de modo que não existe influência das unidades de *input* nas unidades de *output*. Aprender, como em outros modelos PDP (*Parallel Distributed Processing* - Processamento Distribuído em Paralelo), envolve modificação da força (pesos) dessas interconexões (representadas por números: +1 reforça, -1 inibe, ou seja, um modelo binário). Durante a fase de treinamento, são apresentadas ao modelo a forma radical do verbo e a forma-alvo, isto é, o passado daquele verbo. A rede associadora de padrões computa o *output* que o computador deve gerar a partir do *input*. Então, para cada unidade *output*, o modelo compara sua resposta com o alvo (forma correta do passado). Podemos

pensar na forma-alvo como fornecendo um *input* a ser ensinado para cada unidade *output*, dizendo-lhe que valor deve ter. Quando o *output* do programa iguala o *output*-alvo, o modelo está fazendo a coisa certa e assim nenhum dos pesos é ajustado. Quando o *output* do programa é diferente do *output*-alvo, os pesos de todas as unidades de *input* são ajustados.

No modelo de Rumelhart e McClelland (1986), a fase de treinamento foi dividida em três etapas. Na primeira, foram apresentados 10 verbos de alta frequência, 2 regulares e 8 irregulares. Na segunda, foram apresentados 410 verbos de média frequência, 334 regulares e 76 irregulares. Na terceira etapa, 86 verbos de baixa frequência foram apresentados, sendo 72 regulares e 14 irregulares. A tabela que segue apresenta o *corpus* utilizado:

TABELA 1 - Verbos utilizados na fase de treinamento

Etapas/ Verbos	Verbos regulares	Verbos irregulares	Total
1ª) Alta frequência	2	8	10
2ª) Média frequência	334	76	410
3ª) Baixa frequência	72	14	86

É importante notar que a proporção de verbos regulares e irregulares em cada etapa do treinamento procurou captar aproximadamente a experiência com o tempo passado de uma criança em contato com o inglês na conversação do dia-a-dia. Os autores entendem que as crianças aprendem primeiro sobre os tempos presente e passado de verbos de alta frequência; depois disso a aprendizagem ocorre com um grupo muito maior de verbos, incluindo uma proporção muito maior de formas regulares.

Rumelhart e McClelland (1986) ressaltam que o treinamento aplicado ao modelo não reproduz exatamente a experiência de aprendizagem da criança. O treinamento exagera a diferença entre fases iniciais da aprendizagem e fases posteriores, bem como a transição abrupta para um *corpus* maior de verbos. Entretanto, os autores lembram que vários estudos falam do crescimento explosivo do vocabulário da criança em um ponto do desenvolvimento.

Na terceira etapa do treinamento, observou-se o comportamento do modelo diante de 86 verbos de baixa frequência nunca vistos antes. O objetivo desse procedimento foi observar a capacidade de o modelo fazer generalizações. Os resultados mostraram que o modelo age de acordo com o padrão regular para verbos do inglês e que ele pode aplicar esse padrão com alto nível de sucesso tanto para verbos familiares quanto para verbos novos. Outro ponto interessante é que o modelo não abstraiu apenas a regra do passado regular do inglês (+ed), mas também sub-regras.

Rumelhart e McClelland (1986) apresentam várias conclusões a partir do modelo desenvolvido. Destacamos as que nos parecem mais importantes:

1^a) O modelo capta as três etapas da aprendizagem, apresentando comportamentos similares aos observados em crianças: curva em U na aprendizagem do passado dos verbos e coexistência de duas formas de passado para o mesmo verbo.

2^a) O modelo é capaz de generalizar quando diante de verbos nunca vistos antes ou de verbos de baixa frequência.

3^a) O modelo aprendeu, além da regra regular (+ed), sub-regularidades.

4^a) O modelo não passou por nenhuma aprendizagem explícita de regras. A regularização é o produto do ajustamento gradual da força das conexões. A aquisição do passado do inglês pode ser explicada sem recorrer à noção de **regra**, que não é nada mais que uma **descrição** da linguagem.

Em vez de usar regras linguísticas, a rede "pesou" as correlações detectadas entre verbos de entrada e de saída. Como as crianças, a rede usa seu conhecimento para fazer predições. Quando as predições são corretas, ocorre o reforço da sinapse. Do contrário, a sinapse é inibida. Por analogia, podemos sustentar a hipótese de que as crianças fazem o mesmo durante a aquisição da linguagem: comparam suas predições com o modelo adulto. Quando essas predições estão corretas, as sinapses são reforçadas; caso contrário, são inibidas.

3.2 O modelo de Elman

Elman (1990) descreve uma rede recorrente que consegue atribuir palavras a categorias gramaticais (como substantivo e verbo) com base em evidências distribucionais extraídas de seqüências de frases gramaticalmente bem formadas. Num trabalho posterior, Elman (1992) demonstra que as redes recorrentes conseguem aprender dependências gramaticais de longa distância. Como a linguagem é um comportamento que se desenvolve com o tempo e a experiência, é fundamental que a arquitetura da rede possua qualidades dinâmicas e que sobreviva no tempo. As redes recorrentes envolvem o uso de conexões recorrentes de unidades ocultas que voltam a elas. Nas redes recorrentes que Elman emprega para o processamento da linguagem, as *unidades ocultas* assumem a tarefa de representar a estrutura seqüencial de uma série de tempo, fazendo-o de formas surpreendentemente sutis.

Uma rede recorrente é formada por quatro camadas: as unidades de *input*,

as unidades de *output*, as unidades ocultas e as unidades de contexto. As conexões que vão das unidades ocultas até as unidades de contexto são fixas, ao passo que as conexões que vão das unidades de contexto até as unidades ocultas são ajustáveis, do mesmo modo que todas as outras conexões da rede. As unidades de contexto fornecem à rede uma memória dinâmica. É importante ressaltar que as propriedades distribucionais dos estímulos e as relações estruturais que os regem não estão representadas na rede; é exatamente isso que a rede tem que descobrir.

A simulação em computador envolve apresentar à rede palavras sucessivas em uma frase, uma de cada vez, e treiná-la em produzir uma previsão da próxima palavra. O treinamento envolve somente estímulos observáveis no mundo, sem lançar mão de regras ou de qualquer instrução. O *corpus* de treinamento consiste em milhares de frases diferentes que cobrem uma série de tipos estruturais. A rede não pode aprender a predir sem aprender os padrões gramaticais abstratos que regem a ordem das palavras.

Os resultados observados na simulação lembram o Procedimento Close (TAYLOR, 1953). Esse procedimento consiste no apagamento de palavras de um texto a intervalos fixos de 5 ou 6 vocábulos⁴. Assim, são apagados, indiscriminadamente, palavras de qualquer classe, de substantivos a preposições. Entre as aplicações desse procedimento está a observação da capacidade de o indivíduo prever, num determinado contexto lingüístico, os possíveis preenchedores das lacunas. Do preenchimento adequado das lacunas pode-se inferir o conhecimento que o indivíduo possui da estrutura da língua.

A rede de Elman, invariavelmente, ativava, de modo parcial, uma série de possíveis candidatos em sua camada de *output*, sendo que todos eles pertenciam à categoria gramatical apropriada à posição atual na frase. Ou seja, a rede parecia ser capaz de inferir a estrutura gramatical das frases de *input* das próprias seqüências de *input*, e isso sem nenhum conhecimento prévio do tipo de gramática que foi utilizada inicialmente para gerar o conjunto de treinamento. É bom lembrar que as frases de treinamento incluíam verbos de diferentes valências, substantivos que poderiam ocorrer no singular ou no plural, de acordo com a concordância e, ainda, orações encaixadas. Logo, a rede tinha que acompanhar uma concordância a longa distância, bem como diferentes estruturas frasais.

Pode-se perguntar o que as simulações desenvolvidas dentro do paradigma conexionista têm a acrescentar ao nosso conhecimento sobre a linguagem. De fato, as redes neurais artificiais oferecem visões de possíveis mecanismos subjacentes à linguagem humana, quando compreendemos como as redes

⁴ Ver Gabriel e Frömming (2002) para uma descrição detalhada.

funcionam. Uma forma de chegar a essa compreensão é examinar os valores de ativação das unidades ocultas em resposta a padrões individuais de *input* e como as atividades das unidades ocultas mudam com o tempo à medida que uma frase é processada. As regiões de espaço de estados ocupadas por verbos diferem consideravelmente, dependendo de sua estrutura argumental. A representação da estrutura sintática constituinte é refletida pela forma da trajetória da rede pelo espaço de estados. As fronteiras gramaticais refletem-se em voltas características na trajetória, e a estrutura argumental reflete-se por regiões no espaço de estados às quais as trajetórias são atraídas. Os fenômenos de concordância gramatical também se refletem no modelo, mesmo quando os itens estruturalmente relacionados são separados por orações encaixadas. Veja o exemplo:

(1) Os meninos [que perseguem o menino (que persegue o cão)] perseguem a menina.

A análise das ativações das unidades ocultas revela ainda que as representações internas da rede apresentam um alto grau de estruturação. Exemplo disso é que os itens lexicais individuais nas frases são agrupados de forma tal que reflete a identidade exclusiva da palavra e o papel gramatical dessa palavra na frase: agrupamentos de verbos, de substantivos, etc.

Elman (1992) descobriu que expor a rede desde o início do treinamento a estruturas simples e complexas resultava num desempenho ruim em orações complexas. Já uma técnica de treinamento gradativo, primeiro com orações simples e depois com orações complexas, resultou em êxito. As formas simples fornecem à rede uma oportunidade de descobrir os blocos básicos de construção dos constituintes da frase. Essa técnica lembra uma das estratégias de aprendizagem das crianças, que se baseia em um *input* simplificado (SNOW e FERGUSON, 1977).

Elman (1992) manipulou a capacidade que a rede tinha de memorizar palavras previamente processadas. Ele limitou a memória da rede, inicialmente, a três ou quatro palavras. Gradativamente, Elman foi aumentando a capacidade de memorização da rede. Esse procedimento melhorou drasticamente a capacidade de a rede lidar com estruturas sintaticamente complexas, sugerindo que a importância de começar aos poucos também afeta a aquisição da sintaxe pela criança.

Plunkett (1995) lembra que o trabalho de Elman (1990, 1992) representa um passo importante na compreensão de como a constituição sintática poderia ser representada numa rede neural artificial. Contudo, isso não deve sugerir que o problema da aprendizagem da estrutura sintática foi resolvido. Ao contrário,

cada vez mais damos conta de sua imensa complexidade.

4 O PARADIGMA CONEXIONISTA: CONTRIBUIÇÕES PARA A COMPREENSÃO DOS ASPECTOS COGNITIVOS DA LINGUAGEM

O conhecimento cultural e o conhecimento individual são bastante diferentes. O primeiro é acessível a toda comunidade cultural, é confiável, formalizado e universal. Ele deve ter essas características para que as pessoas possam se comunicar e viver em sociedade. Por exemplo, as leis que governam nosso país devem ser do conhecimento da população, para que essa possa cumpri-las. As leis são formalizadas e se aplicam a todos os cidadãos (pelo menos teoricamente).

Já o conhecimento individual é bem menos confiável, mas ao mesmo tempo é muito poderoso porque tem a capacidade de lidar com situações novas, de se deixar levar por intuições muitas vezes verdadeiras. O conhecimento individual, por definição, não é universal, é particular a cada ser humano e constitui o próprio SER no mundo. As "regras" que funcionam com um indivíduo não funcionam necessariamente com outros.

Conceitos e definições fazem parte do conhecimento cultural que devemos possuir para nos integrarmos (e nos comunicarmos) numa sociedade, mas pouco têm a acrescentar num nível individual. O conhecimento cultural lida com símbolos, que podem ser explicados num nível simbólico. Já o conhecimento individual só pode ser explicado num outro nível, cujas unidades situem-se num nível mais básico, um nível subsimbólico.

Muitos avanços têm acontecido nas pesquisas neurológicas. Hoje sabe-se muito mais a respeito do funcionamento do cérebro. O paradigma neuronal, responsável por esses avanços, lida com realidades físicas, concretas, por exemplo, peso do cérebro, número de neurônios, metabolismo cerebral, neurotransmissores, proteínas, sinapses, etc.

O paradigma neuronal aproxima-se da posição behaviorista porque ambos ressaltam a importância da experiência. Os behavioristas acreditavam que a estimulação do ambiente reforçaria uma determinada resposta. Assim também uma rede engramada nos neurônios favorecerá um conjunto de sinapses.

Por outro lado, o paradigma simbólico relaciona-se ao racionalismo, que vê o conhecimento como algo inato e desenvolve suas hipóteses num nível metafísico. A ênfase não está na experiência e sim nas capacidades inatas. O paradigma simbólico tenta explicar a cognição através de símbolos, através de entidades abstratas, imateriais. São criadas regras e princípios que descrevem comporta-

mentos observados. Mas onde estariam armazenados esses símbolos?

O conexionismo difere e aproxima-se de um e de outro paradigma. O conexionismo dá grande importância à experiência, mas não apenas como uma repetição, e sim como o primeiro passo para o estabelecimento de conexões que se espalharão formando uma rede de relações. Essa rede será diferente em cada indivíduo, o que espanta o fantasma de um reducionismo comportamentalista, do tipo estímulo-resposta.

Por levar em conta os aspectos físicos do cérebro, o conexionismo difere do simbolismo. Numa visão conexionista, as abstrações (imateriais) não podem estar registradas no cérebro (material). A consolidação do paradigma conexionista é necessária para integrar os conhecimentos do paradigma neuronal e do paradigma simbólico. Esse novo paradigma deve assumir uma posição intermediária entre os dois outros, de modo que a integração de conhecimentos permita explicar aspectos que não são contemplados nem no nível simbólico nem no nível neuronal, tais como o conhecimento procedural, as inferências e as intuições.

O paradigma simbólico sempre lançou mão da idéia de **regras** para explicar comportamentos. Acontece que esses mesmos comportamentos podem ser simulados em computador, sob a ótica conexionista, sem a necessidade do aprendizado de regras. Outra limitação do paradigma simbólico é que ele defende a idéia de um processamento seqüencial, que inclusive fere o princípio da economia, que é observado num processamento em paralelo. Paralelismo e seqüencialidade não se excluem mutuamente, antes se completam. A seqüencialidade sempre dará conta do conhecimento cultural, formal, enquanto o paralelismo tentará explicar o conhecimento individual. As regras, que não existem num nível conexionista, continuarão tendo sua utilidade na descrição de comportamentos, como o lingüístico. Habilidades de produção e recepção de código escrito continuarão sujeitas à transição:

LEITURA => COMPREENSÃO => ARMAZENAMENTO => PRODUÇÃO
seqüencial *paralelo* *seqüencial*

Segundo Smolensky (1988), o conexionismo não tem a pretensão de substituir outras teorias e sim de enriquecê-las. Os modelos conexionistas são propostos porque sugerem novas formas de pensar sobre vários aspectos da linguagem e da representação da linguagem. Além disso, seus princípios mostram-se válidos na tentativa das ciências cognitivas de lidar com o problema da compreensão da linguagem natural. As redes neurais artificiais oferecem sugestões de possíveis mecanismos subjacentes à linguagem humana quando entendemos como elas funcionam. Exemplo disso é que os modelos PDP

apresentam características "humanas" não previstas pelos pesquisadores. A simulação de Rumelhart e McClelland (1986) apresentou erros similares aos das crianças, como a coexistência de formas do passado - *went, goed**, *wented**. Além disso, a rede aprendeu sub-regularidades do passado do inglês.

O paradigma conexionista fornece uma visão alternativa sobre a existência de regras explícitas. Os modelos PDP desenvolvem simulações capazes de **aprender, generalizar e fazer previsões**, baseados unicamente na exposição à língua, sem nenhuma instrução *a priori*.

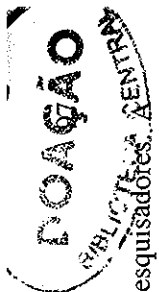
É óbvio que as redes neurais artificiais não dão conta de toda a complexidade presente no processamento da linguagem, até porque há inúmeras limitações tecnológicas, por exemplo: incapacidade dos computadores processarem em paralelo, quantidade de neurônios no cérebro muito superior aos "neurônios" das redes, quantidade de conexões existentes no cérebro infinitamente superior às conexões simuladas, entre outras.

Contudo, os modelos conexionistas podem preencher uma lacuna existente entre a abordagem puramente neurológica e a abordagem simbólica. O conexionismo pretende oferecer ferramentas úteis para uma maior compreensão dos aspectos cognitivos da linguagem. E ainda, mostrar que as propriedades emergentes, analisáveis num nível simbólico, podem ter uma natureza diferente das propriedades fundamentais, analisáveis num nível subsimbólico.

5 CONCLUSÃO

À medida que fomos escrevendo este trabalho, tomamos conhecimento de novas pesquisas, novas bibliografias, novos experimentos, o que gerou uma crescente sensação de angústia quanto à abrangência do quadro teórico esboçado. Correndo o risco de uma afirmação categórica, podemos dizer que nunca se avançou tanto e tão rapidamente no conhecimento sobre o cérebro como na última década. Os avanços tecnológicos têm possibilitado o acesso a informações impensáveis em outros tempos. O grande número de publicações na área comprova que há fortes evidências de que as pesquisas sob a ótica conexionista estão em plena ebulição (a título de exemplo, ver ROSSA e ROSSA, 2004).

Consideramos nosso objetivo alcançado se o leitor for capaz de, a partir das informações aqui apresentadas, compreender as hipóteses fundamentais do conexionismo, perceber a posição desse paradigma em relação a outros arcabouços teóricos e visualizar as contribuições trazidas para o avanço das pesquisas sobre os aspectos cognitivos da linguagem.



REFERÊNCIAS

- CHOMSKY, N. Review of B. F. Skinner's Verbal Behaviour. *Language*, 35, 16-58, 1959.
- DUBOIS, Daniel. *O labirinto da inteligência*. Lisboa: Instituto Piaget, 1994.
- ELMAN, Jeffrey L. Finding structure in time. *Cognitive Science* 14, 179-211, 1990.
- _____. Learning and development in neural networks: the importance of starting small. In.: UMILTA, C. e MOSCOVITCH, M. *Attention and performance XV: conscious and nonconscious information processing*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1992.
- FILLMORE, C. J. The case for case. In: BACH, E. e HARMS, R. T. *Universals in linguistic theory*. New York: Holt, Rinehart & Winston, 1968.
- FODOR, J. A. e PYLYSHYN, Z. Connectionism and cognitive architecture: a critical analysis. *Cognition*, 28, 3-71, 1988.
- GABRIEL, R.; FRÖMMING, M. Compreensão em leitura: como avaliá-la. *Signo*, v. 27, n. 43, 7-44, 2002.
- GARDNER, Howard. *Estruturas da mente: a teoria das inteligências múltiplas*. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 1994.
- GUYTON, Arthur C. e HALL, John E. *Textbook of medical physiology*. Philadelphia: W. B. Saunders Company, 1996.
- MINSKY, M. *The society of mind*. New York: Simon & Shuster, 1985.
- PLUNKETT, Kim. Connectionist approaches to language acquisition. In.: FLETCHER, Paul e MACWHINNEY, Brian. *The handbook of child language*. Oxford, 1995.
- ROSSA, A.; ROSSA, C. *Rumo à psicolinguística conexonista*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2004.
- RUMELHART, D. E. e MCCLELLAND, J. L. On learning the past tense of English verbs. In: MCCLELLAND, J. L. e RUMELHART, D. E. *Parallel Distributed Processing: explorations in the microstructure of cognition - psychological and biological models - vol. 2*. Cambridge: MIT, 1986. p. 216-271.
- SMOLENSKY, Paul. On the proper treatment of connectionism. *Behavioral and Brain Sciences* 11: 1-74, 1988.
- SNOW, C. E. e FERGUSON, C. *Talking to children: language input and language acquisition*. Cambridge: Cambridge University Press, 1977.
- TAYLOR, Wilson. "Cloze procedure" a new tool for measuring readability. *Journalism Quarterly*, XXX: Fall, 1953, p. 415-433.
- VYGOTSKY, L. S. *Pensamento e linguagem*. São Paulo: Martins Fontes, 1993.