

# **Modelo Computacional dos circuitos cerebrais de atenção e memória emocional**

Orlando Antonio Veiga Seixas Júnior

Orientação: Carlos Alberto da Silva Franco, D.Sc., e

Josefino Cabral de Melo Lima, Docteur

UFRJ

2011

# **Modelo Computacional dos circuitos cerebrais de atenção e memória emocional**

por

Orlando Antonio Veiga Seixas Júnior

Dissertação submetida ao corpo docente do Instituto de Matemática e Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Ciência da Computação

Orientador: Carlos Alberto da Silva Franco – D.Sc.

Rio de Janeiro

2008

Ficha Catalográfica

# **Modelo Computacional dos circuitos cerebrais de atenção e memória emocional**

por

Orlando Antonio Veiga Seixas Júnior

Dissertação submetida ao corpo docente do Instituto de Matemática e Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Ciência da Computação

Aprovada por:

---

Carlos Alberto da Silva Franco – D.Sc.

---

Josefino Cabral De Melo Lima – Docteur

---

Adriano Joaquim de Oliveira Cruz – Ph. D.

---

Eber Assis Schmitz – Ph. D.

---

Leonardo Costa De Azevedo – MD. Ph.D.

Rio de Janeiro

2008

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus, que criou o cérebro. A minha esposa. A minha família. A meu orientador. A meus professores da escola, da graduação e do mestrado. A meus amigos mestrados. Ao povo brasileiro, que sustenta universidades públicas. À Petrobrás, que ajudou com a bolsa.

## Resumo

SEIXAS JÚNIOR, Orlando Antonio Veiga. **Modelo Computacional dos circuitos cerebrais de atenção e memória emocional**. Rio de Janeiro, 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Núcleo de Computação Eletrônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Esta pesquisa estende o modelo computacional dos circuitos cerebrais envolvidos no condicionamento por medo (ARAÚJO, 2008) acrescentando a ele as representações do córtex pré-frontal, da massa de células intercaladas da amígdala e do giro do cíngulo anterior. A nova arquitetura confere ao modelo a capacidade de lidar com estímulos não relevantes à tarefa mantendo o foco da atenção nos estímulos úteis.

São apresentados e discutidos os resultados de pesquisas envolvendo a amígdala e o córtex pré-frontal a fim de chegar-se a um modelo teórico que explique a relação entre ambas as estruturas. Outros modelos computacionais são apresentados e discutidos ao longo do trabalho. Apresentam-se os detalhes do modelo elaborado, os testes realizados com ele, suas vantagens, limitações e possibilidades de trabalhos futuros.

Palavras-chave: memória emocional, condicionamento por medo, amígdala, hipocampo, córtex pré-frontal, modelagem computacional biologicamente realista.

## Abstract

SEIXAS JÚNIOR, Orlando Antonio Veiga. **Modelo Computacional dos circuitos cerebrais de atenção e memória emocional**. Rio de Janeiro, 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Núcleo de Computação Eletrônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

In this research, the computational model involving the fear conditioning process (ARAÚJO, 2008) is extended by the addition of new layers representing the prefrontal cortex, the amygdaloid interstitial cell masses and the anterior cingulate gyrus. The additional architecture gives to the model the ability to deal with non relevant stimuli by keeping the focus of attention in the task relevant stimuli.

Results of other researches involving amygdala and prefrontal cortex are presented and discussed in order to build a theoretical model that explains the relationship between both structures. Other computer models are presented and discussed throughout the paper. We present the details of the model developed, the tests performed with it, its advantages, limitations and possibilities for future work.

Keywords: emotional memory, fear conditioning, amygdala, hippocampus, prefrontal cortex, biologically based computational models.

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 Introdução</b> .....	<b>11</b>
<b>Capítulo 2 Emoções e aprendizado</b> .....	<b>17</b>
2.1 Condicionamento clássico aversivo.....	19
2.2 Neurofisiologia da aprendizagem de medo.....	20
2.2.1 Modelo computacional de Varela.....	22
2.2.2 Experimento de Wilensky e colegas.....	26
<b>Capítulo 3 Condicionamento de medo por Contexto</b> .....	<b>28</b>
3.1 Modelo de Araújo .....	29
<b>Capítulo 4 Atenção</b> .....	<b>32</b>
4.1 Modelo computacional de Rougier e colegas .....	34
4.2 Neurofisiologia da atenção e emoção .....	35
<b>Capítulo 5 Experimento</b> .....	<b>37</b>
5.1 Ferramentas .....	37
5.2 Modelo computacional proposto .....	39
5.2.1 Camadas .....	39
5.2.2 Conexões.....	41
5.2.3 Entradas e saídas .....	42
5.2.4 Modificações nos programas .....	45
5.3 Testes realizados .....	47
5.4 Resultados e análises .....	47
<b>Capítulo 6 Conclusão</b> .....	<b>52</b>
<b>Referências</b> .....	<b>56</b>



# Lista de Figuras

Figura 1 - Corte sagital do cérebro indicando a localização do córtex pré-frontal, giro do cíngulo, tálamo, amígdala e hipocampo. ....	15
Figura 2 - Rotas curta e longa de informação sensorial do tálamo até a amígdala.....	21
Figura 3 – Projeções diretas da amígdala cerebelar sobre o hipotálamo e indiretas até o córtex pré-frontal.....	22
Figura 5 - Escala de cores utilizada pelo Emergent para representar a ativação das unidades neuronais. ....	25
Figura 6 - Rede de Varela exibindo resposta condicionada de medo.....	26
Figura 8 - Modelo completo representando amígdala cerebelar e hipocampo, elaborado por Araújo (2008).....	30
Figura 9 - Matrizes de entrada de contexto. ....	31
Figura 10 - Circuito neuronal ligando córtices e amígdala cerebelar.....	36
Figura 11 - Adição de informações irrelevantes às matrizes de estímulo auditivo. ....	44
Figura 12 - Rede contendo amígdala, hipocampo e córtex pré frontal. ....	46
Figura 13 - programa TreinamentoCompleto .....	47
Figura 14 - Número de épocas necessárias para cada Batch convergir pela frequência em que ocorreram .....	51

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Número de unidades neuronais das novas camadas.....	41
Tabela 2 - Projeções adicionadas à rede de Araújo.....	43
Tabela 3 - Número médio de épocas gasto em cada fase do treinamento.....	49
Tabela 4 - Número de épocas gastas por cada Batch nas fases de ambientação e condicionamento.....	50

# Capítulo 1

## Introdução

“Se eu fosse de pano, era provável que também não tivesse medo.  
Mas sou de carne...”

**Dona Benta,  
de Monteiro Lobato**

Entender o funcionamento cerebral constitui um dos grandes desafios da ciência contemporânea. Dada a alta complexidade do sistema nervoso, é comum necessitarmos de auxílio computacional para interpretar tais fenômenos. A construção de modelos e simulações computacionais do cérebro tem sido útil para interpretação de exames, para elaboração de diagnósticos mais precisos e para realização de planejamentos e avaliações dos procedimentos de reabilitação neuropsicológica (LYTTON, HELLMAN, SUTULA, 1998, LABATUT et al, 2004). Em contrapartida, a observação e o entendimento dos fenômenos biológicos e do funcionamento da mente humana contribuem e servem de inspiração para diversos avanços tecnológicos.

As atuais teorias sobre o funcionamento do cérebro podem, de forma muito simplificada, ter seu início marcado por estudos baseados na observação do funcionamento anormal do cérebro, como no caso de malformações e principalmente de lesões. Essas pesquisas deram os primeiros indícios sobre a relação entre as funções cognitivas e a atividade celular cerebral (LENT, 2004).

Trabalhos posteriores indicaram que o processamento cognitivo ocorre por meio de neurônios interconectados que formam uma rede tridimensional. Cada neurônio pode, por meio de seu corpo e de seus dendritos, receber influência de outros, e por meio de seu axônio, enviar influência a outras células. A relação direta entre neurônios pode possuir maior ou

menor peso, e mesmo, ser positiva ou negativa. Em cada momento, o somatório das influências excitatórias e inibidoras que um neurônio recebe pode ser suficiente ou não para ativá-lo. Quando ativado, um neurônio irá liberar substâncias químicas por meio de seu axônio chamadas de neurotransmissores. Através dos neurotransmissores, cada neurônio excita ou inibe a ativação de diversos outros com os quais possua ligação (Ilachinski, 2001).

Hoje, são utilizadas diversas técnicas para estudar a relação entre a cognição e o cérebro. Dentre todas as técnicas, existem três conjuntos que são especialmente importantes para o entendimento deste trabalho: as técnicas de lesão, de imagem e a construção de modelos.

Muitos estudos utilizam a análise e comparação do comportamento em organismos lesionados. Grandes avanços nessa metodologia têm se dado graças à invenção de drogas que permitem um controle mais minucioso das áreas e dos tipos de neurônios a serem lesionados, das funções neuronais específicas que serão abjuradas e do tempo em que essas células assim permanecem.

Grandes avanços nas neurociências se devem às técnicas de imagem, as quais utilizam aparelhos que localizam e mapeiam a atividade neuronal em diferentes áreas cerebrais. Inferimos que o aumento na atividade de certa região observado durante a realização de determinada função cognitiva, indica a importância dessa região na realização da tarefa. A maior vantagem dessas técnicas é que permitem o estudo do funcionamento de cérebros saudáveis.

Outra parte importante da pesquisa cerebral é a construção de modelos (STERN e TRAVIS, 2006). Um modelo é uma representação simplificada da estrutura e/ou do funcionamento de um sistema mais complexo. Modelos simplificam a realidade com o objetivo de potencializar o entendimento que se tem dela. Essa construção e análise é parte fundamental do trabalho científico em diversas áreas do conhecimento. Podem ser usados

tanto na pesquisa, como por exemplo, ao se usar um túnel de vento para testar a aerodinâmica de um carro, como no ensino de conhecimentos já consolidados, como quando se utiliza modelos de plástico para ensinar anatomia em escolas.

Na construção de modelos científicos deve-se tomar diversas decisões entre simplicidade e detalhamento. Alguns elementos do fenômeno real deverão ser deixados de lado enquanto outros estarão retratados com maior fidelidade ou mesmo ampliados na modelagem. O site da empresa Modelmakers (<http://www.modelmakers-uk.co.uk/models-may-2008>) exibe um ótimo exemplo de seleção de características na modelagem. A peça encomendada pelo departamento de engenharia da Cardiff University representa o leito do rio Severn. Tendo seu uso na pesquisa em geração de energia, a peça foi confeccionada de forma desproporcional, com uma escala vertical maior que a horizontal, pois um maior detalhamento horizontal não seria tão importante para compensar as dificuldades de custo e tamanho que traria. Outro exemplo de seleção de características na construção de modelos está nos modelos econômicos. Nenhum modelo econômico retrata a economia em toda sua complexidade. Mesmo assim, sabemos que, *ceteris paribus*, quanto maior a oferta de um produto, menor será seu preço unitário e quanto maior a demanda, maior o preço. Essa lei de oferta e demanda, ignora uma série de detalhes reais da economia, como a lábia do cliente, as brigas internas por poder dentro da empresa etc. Por abrir mão de muitos detalhes sem repudiar as características mais importantes, alguns modelos se tornam mais importantes que outros, permitindo maior geração de previsões e conseqüente teste das teorias que lhes deram origem. Evidentemente, um mesmo fenômeno poderá ser modelado de mais de uma maneira, sendo o melhor modelo variável de acordo com os interesses do cientista.

A aplicação dos modelos lineares de causa e efeito não se mostra suficiente para especificar as exatas relações entre o funcionamento do cérebro no nível celular e sua capacidade de produzir atividades cognitivas mais sofisticadas (LABATUT et al, 2004).

Para ajudar a dar conta desse e de outros fenômenos semelhantemente complexos, a epistemologia contemporânea, cunhou o conceito de emergência. Emergência se refere à observação de que sistemas complexos, formados por partes mais simples, exibem propriedades que não estão presentes nessas partes. Pardiès (2006) define três níveis de emergência: nominal, no qual as propriedades macro podem ser derivadas do conjunto micro, apesar de não fazerem sentido nesse nível; fraco, no qual é possível explicar as propriedades macroscópicas por princípios de atuação das partes menores, mas os detalhes e compreensão não podem ser previstos, por não haver um modelo de causalidade da dinâmica do sistema; e forte, no qual não se pode explicar e muito menos prever os eventos macro com base nas propriedades do micro.

Estudos sobre processamento cerebral são realizados observando-se diferentes camadas microscópicas ou macroscópicas. Pode-se levar em conta determinada camada de detalhamento e não tomar em consideração os níveis acima ou abaixo. E pode-se ainda estabelecer relações entre diferentes camadas.

A construção e o uso de modelos virtuais em computador trazem especial benefício para o estudo neurocientífico, uma vez que a natureza dinâmica do fenômeno exige mais que esquemas estáticos de papel e tinta para ser entendida e que não dispomos de tecnologia capaz de construir modelos reais mecânicos ou biológicos. A modelagem computacional do cérebro exige e gera teorias mais claras de como o cérebro funciona e permite que essas hipóteses sejam testadas sem a necessidade dos altos custos laboratoriais, e ainda sem o sacrifício de animais.

Diversas ferramentas computacionais são utilizadas em estudos neurocientíficos. As mais largamente utilizadas para pesquisas e simulações, tanto em níveis macroscópicos como em microscópicos, têm sido as redes neurais artificiais (LABATUT et al, 2004). Redes neurais artificiais (RNAs) são artefatos computacionais inspirados no funcionamento dos

neurônios no cérebro. Uma RNA é formada por um grafo em que cada nó representa um neurônio, ou um grupo de neurônios, que sofre influência de outros e, ao ser ativado, exerce influência sobre outros neurônios da rede.

Para desempenhar suas funções, as redes neurais passam por uma ou mais fases de aprendizado ou treinamento. O processo de aprendizado da rede é inspirado nas atuais teorias de aprendizado e memória cerebrais e se dá pela mudança de peso nas ligações entre os diversos neurônios da rede, tal como acontece no cérebro quando gravamos novos conteúdos mnêmicos.

Este trabalho pretende construir um modelo computacional dos principais circuitos cerebrais envolvidos na memória emocional. Mais especificamente, visa à modelagem computacional biologicamente realista dos circuitos da amígdala, hipocampo, e córtex pré-frontal. A **Figura 1** esquematiza a localização das principais estruturas estudadas a partir de uma visão medial de um corte sagital do cérebro.

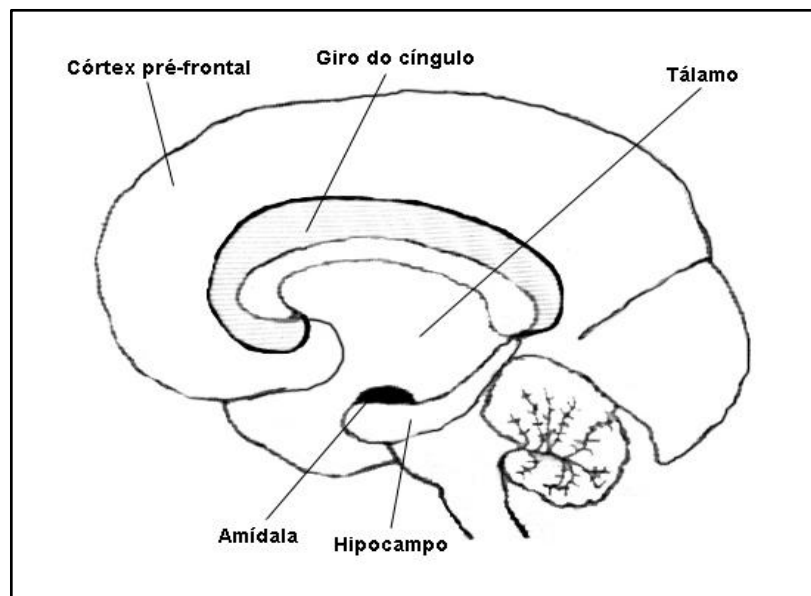


Figura 1 - Corte sagital do cérebro indicando a localização do córtex pré-frontal, giro do cíngulo, tálamo, amígdala e hipocampo.

Espera-se que o modelo contribua para um melhor entendimento do papel dos diferentes núcleos da amígdala, do hipocampo e do córtex pré-frontal no processamento, aprendizado e evocação das memórias emocionais.

Espera-se também que contribua para o desenvolvimento de novas tecnologias de informática e robótica por meio do desenvolvimento de novos algoritmos de aprendizagem de máquina inspirados na biologia.

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. No segundo capítulo, é abordado o tema do medo e seu aprendizado. São descritas teorias e modelos que tentam explicar os mecanismos fisiológicos subjacentes a este fenômeno. O terceiro capítulo trata do papel do contexto no aprendizado emocional, descreve as estruturas cerebrais responsáveis pelo tratamento e aprendizado da informação contextual e apresenta um modelo computacional de tais estruturas. Modelo a partir do qual o presente trabalho se alicerça. No quarto capítulo o tema da atenção é trabalhado. Apresenta-se a definição de atenção adotada, os mecanismos cerebrais que a sustentam e alguns trabalhos já existentes sobre o tema. O quinto capítulo descreve o modelo construído para esta pesquisa, assim como os principais testes realizados e os resultados obtidos com ele. O sexto capítulo traz as considerações finais, conclusões e propostas de trabalhos futuros.



## Capítulo 2

### Emoções e aprendizado

“O medo me fascina”  
**Ayrton Senna**

Damasio (2000) descreve as emoções como “coleções específicas e consistentes de respostas fisiológicas disparadas por determinados sistemas cerebrais quando o organismo representa certos objetos ou situações”.

As emoções inatas permitem ao organismo lidar com circunstâncias comuns a uma ou mais espécies. Podem preparar o corpo e influenciar todo o funcionamento cognitivo levando o cérebro a estados de ativação que o predisõem a certos tipos de processamento. Um exemplo disso é a maior facilidade que os seres humanos temos em acessar memórias que se coadunam com nosso presente estado emocional. Tal predisposição pode ser muito útil quando em um momento de medo nos tornamos capazes de lembrar mais rapidamente de outras situações perigosas do passado e de como elas se desenrolaram. Tais evocações mnêmicas permitem uma tomada de decisão mais rápida e mais bem fundamentada em experiências reais. Por outra via, enquanto a consciência se ocupa de avaliar a situação, o sistema emocional já tomou providências, ativando músculos de fuga e redirecionando fluxos de oxigênio e nutrientes para maximizar a ação iminente. As emoções são, portanto, “parte fundamental dos dispositivos biorregulatórios necessários à nossa sobrevivência” (Damasio, 2000).

Damasio (2000) ressalta casos de pacientes que, por conta de lesões cerebrais, tiveram prejuízo de algumas funções emocionais. A princípio, as capacidades cognitivas racionais dessas pessoas haviam ficado intactas. Entretanto, quando submetidas a situações de risco ou

situações de conflito, em que qualquer ação tomada levaria conjuntamente a benefícios e prejuízos distintos, essas pessoas apresentaram sérias dificuldades em tomar as decisões que lhes seriam vantajosas. Tal dificuldade evidenciou-se também em situações de interação social.

A hipótese de Damásio é que as emoções servem de guia, apontando um setor do espaço de tomada de decisão em que a racionalidade deve trabalhar para cumprir seu papel. As emoções não substituem a racionalidade, admite-se até que, em certas situações, podem atrapalhá-la. Mas, em grande parte das situações, emoções bem ajustadas ajudam e servem como base para que a racionalidade funcione. Estes exemplos indicam a importância das emoções para a cognição e mostram que a falta de emoções, assim como o excesso, pode impedir o desempenho de atividades racionais.

Ledoux (1998, pág 12) observa duas maneiras pelas quais a literatura científica costuma abordar o tema: uma que analisa as emoções como estados psicológicos e outra que as estuda observando o funcionamento do cérebro. Este autor argumenta que, apesar da grande utilidade do estudo por meio dos estados psíquicos, o escrutínio do funcionamento cerebral é mais proveitoso, uma vez que permite melhor controle das variáveis envolvidas e conseqüente ampliação das oportunidades de se obter grandes descobertas científicas.

Dentre uma gama de emoções possíveis, este trabalho se restringirá ao estudo das emoções relacionadas à evitação de objetos e situações. Chamaremos a esse conjunto de reações de medo. O medo foi escolhido por ser a emoção mais largamente estudada na literatura neurocientífica. Ele constitui a emoção de mensuração mais precisa e está presente em animais de forma muito semelhante à que se apresenta nos seres humanos. O medo é ainda uma emoção importante em diversos distúrbios psíquicos, o que torna seu estudo um importante aliado na promoção da saúde mental (LEDOUX, 1998).

Evitar situações que podem promover dano ao sistema é uma capacidade útil para máquinas de todo o tipo, por isso a produção de um sistema computacional capaz de identificar quais estados podem danificá-lo e de decidir como reagir para evitá-los é de grande interesse para a informática e a robótica. A utilização crescente de máquinas em ambientes menos controlados que as tradicionais linhas de produção tem exigido robôs com maior autonomia e flexibilidade. Não basta que essas máquinas sejam capazes de decidir com base em programas previamente estabelecidos, elas precisam ser capazes de aprender e se adaptar durante seu funcionamento para agir adequadamente em ambientes desconhecidos e em situações não previstas pelo programador. Dessa forma, além das reações de medo, devem-se dotar essas máquinas da habilidade de aprendizado e memória emocional.

## 2.1. Condicionamento clássico aversivo

O aprendizado por condicionamento foi estudado pela primeira vez por Ivan Pavlov. O cientista russo estudava as glândulas salivares de cachorros quando percebeu que, ao longo do tempo vivendo no laboratório, ocorriam algumas mudanças em seu comportamento. Os animais associavam os sinais da chegada do funcionário com o recebimento da comida que ele trazia, e passavam a salivar antes que pudessem perceber o alimento. Pavlov fez diversos experimentos nos quais ensinou os animais a reagirem com salivação diante de diferentes estímulos que inicialmente não gerariam qualquer reação.

A este fenômeno em que um organismo passa a emitir as mesmas reações diante de um estímulo qualquer que anteriormente eram emitidas somente diante de estímulos relevantes, chamamos de condicionamento clássico. Nesse tipo de aprendizado, um estímulo chamado de incondicionado (EI) que dispara uma resposta incondicionada (RI) se associa a um estímulo neutro (EN) fazendo com que o organismo passe a reagir diante deste de forma semelhante a que se comportaria na presença daquele. Passa-se então a chamar o estímulo

neutro de estímulo condicionado (EC) e à resposta que ele gera de resposta condicionada (RC).

O condicionamento de repostas de medo é um caso específico de condicionamento clássico no qual o estímulo incondicionado é um estímulo nocivo e a resposta incondicionada é uma resposta de evitação ou de fuga. Existem, portanto, nos organismos dotados de memória, respostas de medo inatas e outras aprendidas.

Tal aprendizado é de suma importância para a sobrevivência, tanto de animais como do homem. Existem diversas situações diante das quais a genética não é suficiente para livrar do perigo, para tais os organismos inteligentes contam com a memória. O medo inato protege o organismo de situações que são comumente perigosas a toda a espécie no decorrer de várias e várias gerações. O condicionamento de medo é necessário para situações de risco mais recentes, locais, ou mesmo individuais. No meio humano civilizado esse aprendizado pode ser ainda mais importante, pois a mudança constante do meio provocada pelo próprio homem o expõe a riscos sempre distintos dos que viveram as gerações anteriores. Para sobreviver nesse contexto, o cérebro precisa desenvolver mecanismos tanto de supressão de medos inatos, como de manifestação de medos novos aprendidos.

## 2.2. Neurofisiologia da aprendizagem de medo

As associações relacionadas a estímulos emocionalmente relevantes dependem principalmente de uma estrutura cerebral em formato de amêndoa, localizada no lobo temporal, chamada de amígdala cerebelar (LEDOUX, 1998). A amígdala é formada por diversos núcleos interconectados entre si, sendo os principais deles: o Núcleo Lateral (LA), o Núcleo Basal (BA) e o Núcleo Central (CE).

Ao núcleo lateral da amígdala, chegam informações oriundas diretamente do tálamo sensorial o qual é a porta de entrada do cérebro para as informações dos órgãos dos sentidos.

Chegam também ao LA, informações mais bem processadas oriundas dos córtices sensoriais. A ligação talâmica, chamada de rota curta, permite maior rapidez de resposta, enquanto o caminho que passa pelo córtex sensorial - rota longa - permite respostas mais precisas a um custo de tempo maior.

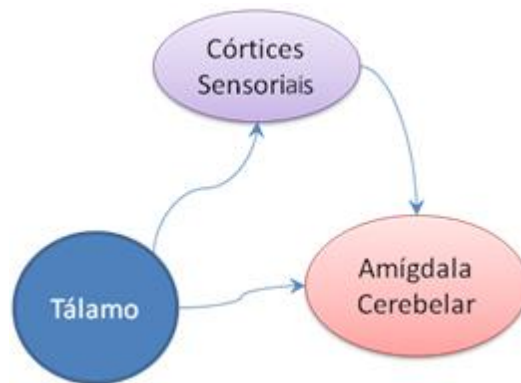


Figura 2 - Rotas curta e longa de informação sensorial do tálamo até a amígdala.

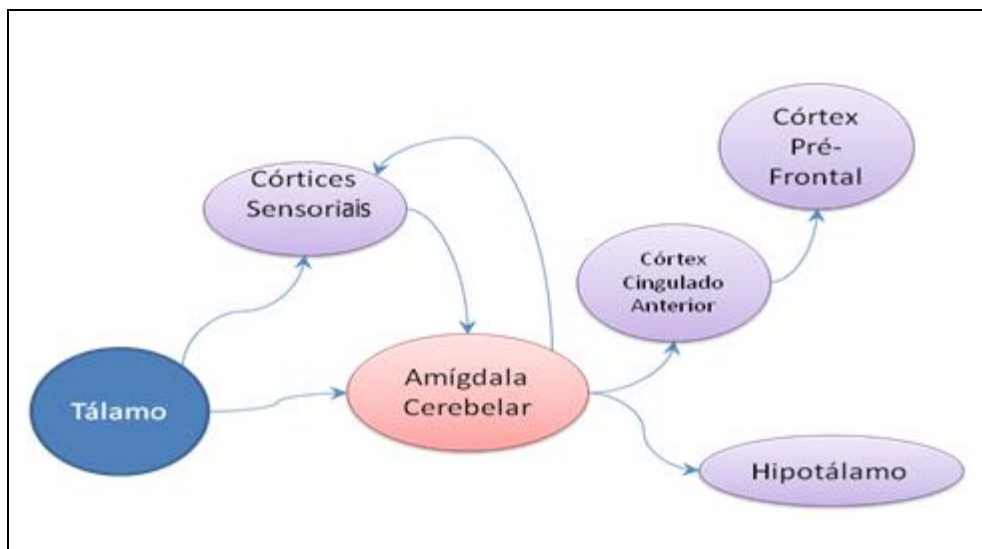
Do núcleo central da amígdala saem projeções de axônios dos neurônios responsáveis pela manifestação das respostas emocionais. O CE projeta axônios para diversas áreas do cérebro, dentre as quais estão os córtices sensoriais, o córtex cingulado anterior e o hipotálamo.

As projeções para o hipotálamo o estimulam a ativar a hipófise que será responsável pelas alterações hormonais relacionadas ao medo e ao estresse. Os hormônios hipofisários afetam todo o organismo, sendo responsáveis pela manifestação visceral do estado emocional. Eles induzem o córtex das glândulas supra-renais a produzir hormônios esteróides que viajarão na corrente sanguínea até o cérebro e serão captados pelas células cerebrais, levando assim, por uma via hormonal, o próprio funcionamento cerebral a um estado alterado de medo. A influência dos hormônios emocionais no cérebro é exercida na execução de praticamente todas as suas funções, afetando memória, percepção, planejamento etc. Toda essa alteração hormonal, por sua própria natureza, tende a ser de ação mais lenta e mais duradoura que os resultados comportamentais induzidos diretamente por neurônios. E gera

um estado físico e mental inespecífico de medo preparando o organismo para ações de luta ou fuga.

As projeções do núcleo central para os córtices sensoriais são responsáveis pela influência direta das emoções na percepção (Vuilleumier e Driver, 2007) e as projeções para o córtex cingulado anterior são o provável caminho de chegada da informação emocional ao córtex pré-frontal onde irão permitir a percepção consciente da associação estímulo-emoção, permitindo respostas mais elaboradas e o direcionamento da atenção para os estímulos emocionalmente relevantes (PESSOA, 2009).

A Figura 3 indica a influência da amígdala sobre o hipotálamo e sobre os córtices sensoriais e prefrontal.



**Figura 3 – Projeções diretas da amígdala cerebelar sobre o hipotálamo e indiretas até o córtex pré-frontal.**

### 2.2.1. Modelo computacional de Varela

Em 2006, Varela compôs um modelo computacional do condicionamento por medo que envolve os núcleos lateral, basal e central da amígdala. Tal modelo contempla a existência de dois caminhos paralelos, assim chamados caminho curto, no qual as

informações vão do tálamo diretamente para a amígdala, e caminho longo, no qual as informações que saem do tálamo passam pelo córtex e de lá seguem para a amígdala.

O modelo computacional possui dez camadas, representando o estímulo auditivo, o estímulo somestésico, as regiões auditiva e somestésica do tálamo, dois dos córtices sensoriais (auditivo e somestésico), os núcleos lateral, basal e central da amígdala cerebelar e, por último, uma camada que representa a intensidade da saída de medo gerada.

As camadas de entrada possuem seis neurônios cada. As matrizes de entrada auditiva e somestésica podem assumir cinco diferentes padrões representando cinco sons e cinco sensações táteis respectivamente. As matrizes de entrada foram elaboradas tendo em vista que as diferentes sensações percebidas pelos organismos não formam tipos estanques, mas fazem parte de um contínuo. Assim, os padrões elaborados formam propositalmente sobreposições entre cada tipo de estímulo e o estímulo subsequente. A Figura 4 ilustra os cinco tipos possíveis de matriz de entrada, que são semelhantes para estímulos táteis ou somestésicos.

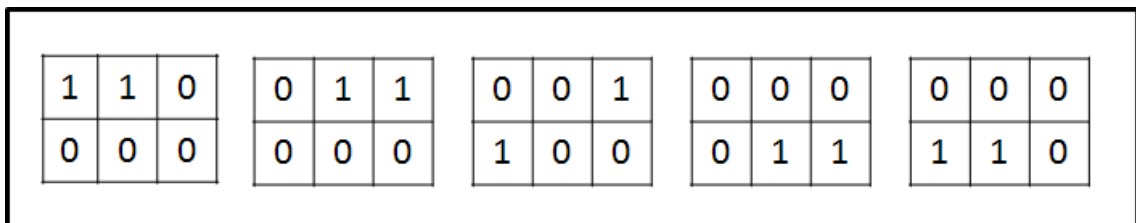


Figura 4 – Cinco diferentes padrões das matrizes de entrada de Varela.

Cada camada de entrada se comunica apenas com a camada talâmica correspondente. As camadas tálamo auditivo e tálamo somestésico estão programadas para não executarem nenhum tipo de processamento no estímulo recebido, elas funcionam como meros repassadores e distribuidores de informação. Cada camada talâmica envia projeções para o córtex correspondente - início da rota longa - e ambas enviam projeção para o núcleo lateral da amígdala – rota curta.

Cada camada cortical envia uma projeção para o núcleo basal da amígdala, fechando assim a rota longa da informação emocional. O núcleo lateral envia projeções para os núcleos central e basal da amígdala. O núcleo basal envia conexões ao núcleo central que envia para a camada de saída. A camada de saída é constituída de uma única unidade neuronal que pode estar ativada (um) representando uma saída comportamental de medo ou desativada (zero) representando que a rede não tem medo dos estímulos apresentados.

A primeira fase de treinamento criada por Varela, representa a formação do cérebro. Nesta fase são apresentados à rede somente estímulos somestésicos. Convenciona-se um desses padrões (no experimento foi utilizado o primeiro padrão) para representar um estímulo aversivo incondicionado (EI) ao organismo. Sempre que tal padrão for apresentado à rede, será apresentado concomitantemente um alvo (target) para a saída tipo um. Ao serem apresentados quaisquer outros padrões, a rede recebe uma saída alvo tipo zero. Por aprendizagem supervisionada, ao final desta fase de treinamento, a rede responderá manifestando medo sempre que receber o estímulo aversivo.

A segunda fase de treinamento é a fase de condicionamento. Nessa fase, são apresentados todos os estímulos sonoros e somestésicos. Seleciona-se um estímulo sonoro específico para se tornar o estímulo condicionado (EC). Sempre que o estímulo condicionado é apresentado, o estímulo somestésico também o é, e vice versa. Junto a ambos, a saída alvo tipo um continua sendo outorgada. Ao final da fase de condicionamento a rede é testada com a exibição somente do estímulo sonoro, sem a presença do somestésico e o resultado encontrado é a manifestação de medo tal qual diante do EI.

O modelo de varela foi elaborado utilizando a ferramenta PDP. Tal ferramenta foi descontinuada pelos desenvolvedores que confeccionaram a partir dela, a ferramenta Emergent. Uma vez que o Emergent é apenas parcialmente compatível com o modelo contruído por Varela, alguns recursos da rede antiga, tais como as matrizes de entrada e saída,



não funcionaram no novo software. Por este motivo, como parte dos testes preliminares para este trabalho, uma reconstrução da rede de Varela foi implementada e testada utilizando-se a nova ferramenta.

A visualização que o *Emergent* gera, representa cada unidade neuronal por meio de um paralelepípedo de base quadrada. O grau de ativação da unidade é representado pela altura desse paralelepípedo e, de forma redundante, por uma escala de cores que vai do cinza, passando pelo vermelho até o amarelo para valores positivos. E, no sentido oposto, para valores negativos, vai do cinza passando pelo azul até o ciano. A Figura 5 mostra a escala de cores utilizada.

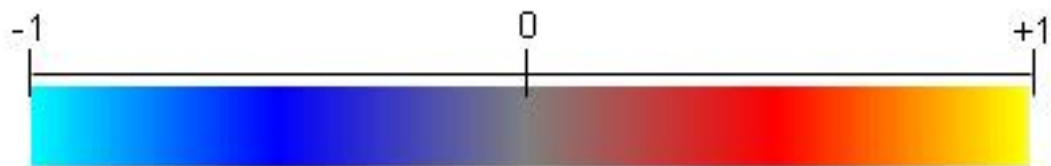


Figura 5 - Escala de cores utilizada pelo Emergent para representar a ativação das unidades neuronais.

A Figura 6, exibe a replicação da rede de Varela feita na ferramenta Emergent. Esta imagem foi gerada durante o teste da rede, após o condicionamento. No topo da imagem, observa-se a camada de saída emitindo uma resposta de medo diante do estímulo auditivo (camada de baixo, à direita), mesmo sem que o estímulo aversivo inato (camada de baixo, à esquerda) esteja presente.

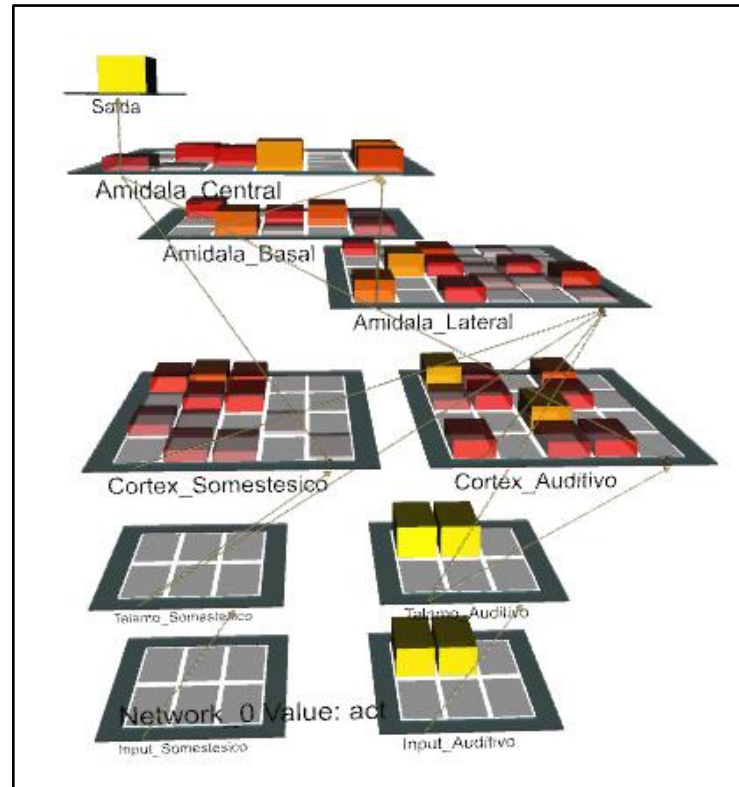


Figura 6 - Rede de Varela exibindo resposta condicionada de medo.

### 2.2.2. Experimento de Wilensky e colegas

No mesmo ano em que Varela concluiu seu modelo computacional, Wilensky e colegas (2006) publicaram seus experimentos com ratos em laboratório e levantaram uma nova visão, divergente da adotada por Varela, sobre o papel dos núcleos amigdalóides lateral e central no condicionamento do medo. Segundo Wilensky, além das projeções do tálamo e do córtex que chegam ao núcleo lateral da amígdala, há também importantes projeções talâmicas e corticais que aportam no núcleo central.

Apoiando tal afirmação estão os experimentos em que os pesquisadores bloquearam, com uso de drogas, a ativação do núcleo central (mas não do núcleo lateral) em ratos durante a fase de aprendizado da associação entre um estímulo neutro e um estímulo inato gerador de medo. Sua hipótese era que se o núcleo central fosse responsável somente pela manifestação do medo e não por seu aprendizado, sua inibição durante a fase de aprendizado não deveria

fazer efeito algum, desde que sua ativação normal pudesse estar restaurada na fase de testes. Após o efeito da droga passar, os ratos foram testados diante do estímulo condicionado sem apresentar comportamento de medo.

Os resultados laboratoriais de Wilensky e colegas indicaram que a importância do núcleo central, está ligada não somente à manifestação do medo, mas à própria construção da associação entre estímulos. Os pesquisadores afirmam, portanto, que as projeções corticais que aportam no núcleo central, são importantes para o condicionamento de medo e não apenas às que chegam ao núcleo lateral.

Para a construção do presente trabalho, foram realizados testes preliminares aplicando-se as modificações sugeridas pela teoria de Wilensky e colegas (2006) a um modelo computacional que descende do modelo de Varela, o modelo implementado por Araújo em 2008. Ou seja, foram adicionadas, à rede de Araújo, conexões que partem dos córtices sensoriais em direção ao núcleo central. A rede foi treinada a partir de pesos iniciais aleatórios, cinquenta vezes para cada versão, a original de Araújo e a modificada conforme as propostas de Wilensky. Os batchs que seguiam Wilensky exibiram uma diminuição média de 18,3% no número de épocas necessárias para a rede convergir. Baseando-se nos experimentos de Wilensky e nos resultados desses testes preliminares, foram adotadas, no modelo final, conexões partindo dos córtices sensoriais para o núcleo central da amígdala, além das previamente existentes para o núcleo lateral.

## Capítulo 3

### Condicionamento de medo por Contexto

“Have you run your fingers down the wall  
 And have you felt your neck skin crawl  
 When you're searching for the light?  
 Sometimes when you're scared to take a look  
 At the corner of the room  
 You've sensed that something's watching you

Fear of the dark, fear of the dark  
 I have a constant fear that something's always near”  
**Fear of the dark, de Iron Maiden**

Araújo (2008) expandiu o modelo de Varela adicionando novas regiões cerebrais e novas funcionalidades. O modelo de Araújo tem por objetivo simular a influência do contexto no condicionamento de medo. A memória contextual difere da memória envolvendo pistas mais simples, já estudada por Varela, por configurar uma união de vários estímulos que aparecem em segundo plano. Mais que a simples junção, a informação da memória contextual contém as relações entre esses estímulos individuais, tais como as condições de luminosidade, as cores, temperatura e cheiros típicos de determinado ambiente.

Hipocampo é uma estrutura localizada na base medial do córtex temporal. De acordo com a literatura neurocientífica, a região cerebral responsável por armazenar a informação do contexto em que determinado condicionamento é relevante é o hipocampo. Estudos demonstram que a lesão desta região faz com que ocorra uma diminuição significativa no comportamento de medo relacionado ao contexto (BRANDAO ET AL, 2003).

Pode-se dividir a região hipocampal em quatro estruturas: córtex entorrinal, giro denteado, corno de Ammon e complexo subicular. O corno de Ammon por sua vez pode ser dividido, de acordo com o tipo de células e as projeções axonais encontradas, em quatro áreas distintas: CA1, CA2, CA3 e CA4.

### 3.1 Modelo computacional de Araújo

A partir do modelo de Varela, Araújo (2008) adicionou novas estruturas com o objetivo de representar o funcionamento do hipocampo. A função do hipocampo, nesse modelo, é a discriminação de contexto no aprendizado do medo.

A arquitetura final adotada por Araújo acrescenta cinco novas camadas ao modelo de Varela, as quais representam o córtex entorrinal, o giro denteado, as regiões CA1 e CA3 do Corno de Amon e o subículo. A Figura 7 esquematiza as novas camadas e como elas se relacionam entre si e com a amígdala. As setas indicam o sentido de influência de cada projeção de axônios.

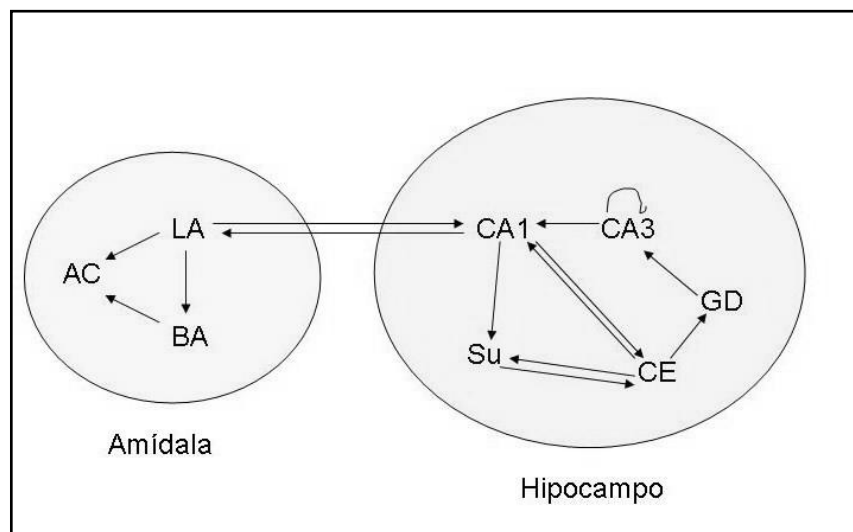


Figura 7 - Projeções entre a amígdala e o hipocampo. (Fonte: Araújo, 2008)

Legendas: LA=Amígdala Lateral, BA=Amígdala Basal, CA=Amígdala Central, CE=Córtex Entorrinal, GD=Giro Denteado, Su=Subículo

O córtex entorrinal constitui a porta de entrada das informações de contexto ao hipocampo, portanto, foi modelado como uma camada de entrada (input layer). Todas as demais camadas, adicionadas por Araújo ao projeto, constituem camadas escondidas (hidden layer).

Assim como foi feito com as camadas, todas as projeções existentes no modelo de Varela foram mantidas na versão de Araújo, e novas foram criadas. O córtex entorrinal envia projeções ao giro denteado, ao subículo e à região CA1 do Corno de Amon. O giro denteado envia axônios para a região CA3 do Corno de Amon. A região CA3 envia duas projeções: a primeira para CA1 e a segunda para ela mesma. A região CA1 projeta para o córtex entorrinal, para o subículo e é responsável pela ligação com a amígdala, mantendo projeções recíprocas com o núcleo lateral. Além de receber projeções de CA1, o subículo envia e recebe projeções do córtex entorrinal.

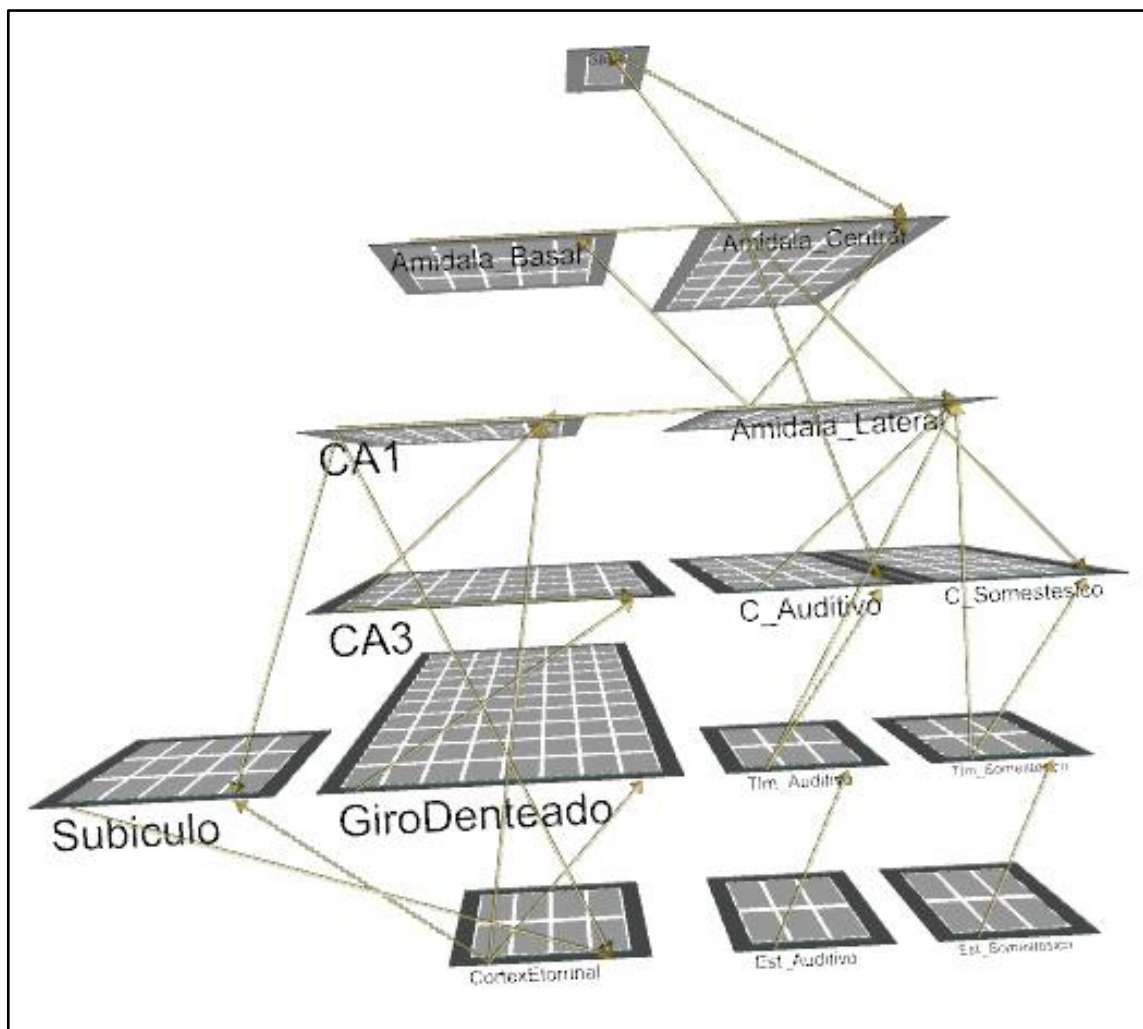


Figura 8 - Modelo completo representando amígdala cerebelar e hipocampo, elaborado por Araújo (2008).

O córtex entorrinal possui oito unidades neuronais. No experimento realizado por Araújo, duas diferentes matrizes de entrada foram utilizadas a fim de representar dois diferentes contextos. A Figura 9 mostra os dois tipos de contextos utilizados. A matriz à esquerda da figura representa o contexto que se convencionará chamar de Contexto A; à direita, está o Contexto B. Em laboratório, esses contextos representam situações experimentais nas quais o condicionamento é realizado propositalmente em uma gaiola ou horário específicos.

0	1	1	0
0	0	0	0

1	0	0	1
0	1	1	0

Figura 9 - Matrizes de entrada de contexto.

Durante a fase de condicionamento de Varela (2006), o estímulo incondicionado gerador de medo é apresentado sempre pareado com o som específico que passará a ser o estímulo condicionado (EC). Além da presença do som, Araújo (2008) apresenta o estímulo incondicionado aversivo sempre na presença do Contexto A, formando assim uma associação entre o EI e um conjunto de estímulos uniforme indicadores de perigo.

## Capítulo 4

### Atenção

“Tu vês muitas coisas, mas não as observas;  
ainda que tens os ouvidos abertos, nada ouves.”

**Isaías, capítulo 42 versículo 20, Bíblia**

Para ler precisamos nos tornar alheios à maior parte dos sons que nos advêm. Precisamos ignorar as sensações táteis recebidas dos pés, das nádegas e das costas. Devemos inibir o processamento de parte da informação visual que contem os detalhes de cada letra, a textura do papel, as pequenas falhas de impressão e os objetos que ladeiam o livro. Nossos sentidos nos inundam com informações a cada instante, entretanto não processamos todas elas com a mesma dedicação. Nossos pensamentos podem seguir diversos caminhos, mas selecionamos apenas alguns para destacar e levar adiante, enquanto a outros inibimos. A essa seleção de informações, de fluxos de pensamento e de ação, ao controle constante que se exerce sobre o que será inibido e o que será ressaltado, chamamos de atenção (LURIA, 1979).

Estudos laboratoriais são realizados adotando-se definições operacionais de atenção distantes umas das outras. Testes psicológicos e laboratoriais avaliam diversas funções cognitivas sob o título de atenção. Diferentes lesões e doenças que prejudicam a atenção podem causar sintomas diversos ou mesmo opostos, tais como dificuldade em concentrar a atenção em um único objeto ou dificuldade em processar diversos objetos ao mesmo tempo. Há estudos que analisam casos específicos, tais como o aumento da atenção quando as expectativas de recompensa são frustradas.

Atenção não é uma habilidade única ela é constituída por um vasto conjunto de habilidades e comportamentos os quais podem (e devem) ser estudados separadamente pela



neurociência. Fala-se então que existem diversos tipos de atenção, assim como se diz dos diversos tipos de memória.

Exemplificando a relação entre diferentes capacidades atencionais está o experimento de MADUREIRA, CARVALHO e CHENIAUX (2007) que analisa, por meio de um modelo computacional, tanto o fenômeno da hiperfocalização atencional, no qual o organismo tem dificuldade em mudar o foco da atenção quando necessário, como o fenômeno da desfocalização, onde a atenção não se sustenta por muito tempo no mesmo objeto. Embora existam distintas habilidades atencionais, todas estão relacionadas a sistemas que controlam quais elementos receberão maior quantidade de determinados recursos cognitivos e quais receberão menos. As diferentes habilidades que constituem o fenômeno da atenção atuam de forma complementar para dar conta dos conflitos entre a necessidade de processar diferentes objetos simultaneamente e a limitação das capacidades perceptivas e cognitivas do organismo que o obrigam a escolher alguns elementos em detrimento de outros.

A principal área cerebral, referida na literatura, responsável pelo controle atencional é o Córtex Pré-Frontal. As capacidades de manter a atenção em uma tarefa ao longo do tempo, de ignorar estímulos irrelevantes e de modificar o foco da atenção quando necessário podem ser gravemente prejudicadas ou mesmo completamente perdidas em pacientes ou animais que sofreram lesões nesta região (O'REILLY, 2006).

Diante de várias abordagens possíveis ao fenômeno da atenção, o estudo proposto por este trabalho foca na capacidade dos organismos de ignorar estímulos irrelevantes a fim de focar seus recursos cognitivos nos estímulos de maior valor emocional. Visa elucidar o funcionamento fisiológico cerebral responsável pelo aumento da atenção diante de tais estímulos em detrimento dos estímulos neutros. Objetiva ainda estudar os efeitos da atenção sobre o aprendizado emocional e as estruturas cerebrais responsáveis por tal influência.

#### 4.1. Modelo computacional de Rougier e colegas.

Seguindo esta linha de experimentação, Rougier e colegas (2005), construíram um modelo computacional representando o córtex pré-frontal humano. O modelo utiliza o algoritmo LEABRA, o mesmo utilizado por Varela e Araújo e que também é utilizado no presente trabalho. As principais características do LEABRA são descritas na capítulo 5, metodologia.

O projeto inclui quatro camadas de entrada. Duas dessas camadas, chamadas de esquerda e direita, são responsáveis por indicar à rede as diferentes características de respectivos dois objetos percebidos. A terceira camada de entrada indica a tarefa que deve ser realizada. As tarefas requisitadas são sempre comparações entre o objeto da esquerda e o da direita e incluem verificações de semelhança e comparações do tipo maior-menor entre características desses objetos. A quarta entrada indica qual característica dos objetos apresentados deve ser levada em consideração na realização da tarefa.

Cada camada de sensações possui cinco linhas e quatro colunas. Cada linha representa uma de cinco diferentes dimensões ou características do objeto observado (por exemplo: cor, tamanho ou forma). Cada coluna representa um valor distinto que tal característica pode assumir (por exemplo: azul, grande, círculo). As tarefas envolvem comparações entre a entrada esquerda e a direita levando-se em conta somente uma das linhas e ignorando as demais.

A rede resultante mostrou-se capaz de resolver exercícios de atenção semelhantes aos testes psicológicos (Stroop Test) que são comumente utilizados para avaliar disfunções do córtex pré-frontal em humanos.

Uma nova versão mais sofisticada dessa mesma rede foi publicada em 2007 por Hazy e colegas. A nova arquitetura permitiu que a rede atendesse a demandas de aprendizado ainda mais rigorosas permitindo a realização de testes psicológicos mais sofisticados. Foi conferida

ao modelo a capacidade de modificar o foco da atenção durante o treinamento, somente por meio das recompensas recebidas, sem que para isso precise receber instruções através da camada que indica a dimensão.

## 4.2. Neurofisiologia da atenção e emoção

O controle atencional afeta o modo como o indivíduo percebe as situações e, a partir daí, sua influência se faz em todas as áreas da cognição. Debaixo da esfera de influencia da atenção, também estão a manifestação e a memória emocionais. No sentido inverso, as emoções exercem forte influencia sobre a atenção (ESPERIDIÃO ET AL, 2008). Um bom exemplo de tal fenômeno é a pesquisa de Erthal e colegas (2004) a qual evidencia que estímulos com valência emocional negativa são privilegiados pela atenção em relação a estímulos emocionalmente neutros.

Do núcleo Central da amígdala cerebelar saem projeções responsáveis pela manifestação das respostas de medo. Dentre essas respostas estão uma série de modificações responsáveis pelo controle atencional. Pessoa (2009) propõe dois caminhos pelos quais as emoções afetam a atenção. O primeiro é direto, consistindo nas vias axonais que saem do núcleo central da amígdala (CE) e se dirigem diretamente aos córtices sensoriais. No segundo caminho, a representação do significado emocional passa provavelmente pelo córtex cingulado anterior e de lá segue caminho para o córtex pré-frontal (CPF). O controle executivo exercido pelo CPF irá promover o engajamento atencional, guiando todo o córtex sensorial, estabelecendo prioridades de processamento aos estímulos emocionalmente relevantes.

O controle do CPF manifesta-se também sobre a amígdala, por meio de projeções inibitórias, principalmente sobre o núcleo lateral e sobre a massa de células intercaladas (MCIs). Esse grupo de células é formado por neurônios da amígdala localizados entre os

núcleos, esses neurônios possuem projeções inibitórias sobre núcleos basal, lateral e central. Por este motivo, a partir da ativação das MCIs, o CPF pode inibir os núcleos da amígdala, e mais notadamente o núcleo central. Dessa forma o CPF inibe manifestações de medo desnecessárias e promove a extinção da manifestação de associações obsoletas (SOTRES-BAYON, CAIN e LEDOUX, 2006).

A figura a seguir mostra o circuito formado a partir das informações expostas. Em vermelho, pode-se observar as projeções inibitórias e, em azul, as excitatórias. Por questões de simplificação do desenho, não está sendo mostrado aqui o circuito do hipocampo, que está presente no modelo computacional.

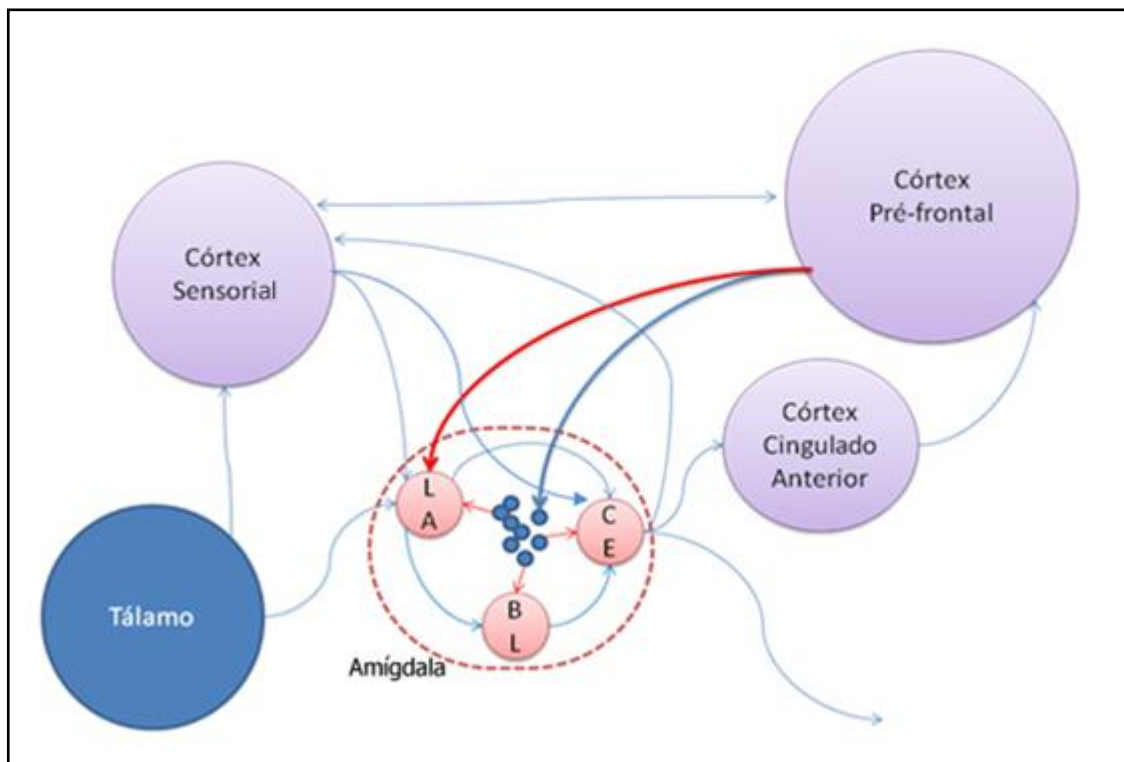


Figura 10 - Circuito neuronal ligando córtices e amígdala cerebral.

## Capítulo 5

### Experimento

Pare, Dave. Tenho medo. Estou com medo, Dave.  
**Computador HAL 9000,**  
**Filme 2001 uma odisséia no espaço.**

Este capítulo detalha a construção do modelo computacional proposto, descreve a metodologia utilizada e as características das ferramentas escolhidas para tal. Relata ainda os testes que foram realizados com o modelo e os resultados obtidos.

#### 5.1. Ferramentas:

Foi construído um modelo computacional utilizando a plataforma *Emergent* versão 5.0.1, que é a atual sucessora do descontinuado PDP++, utilizado por Varella em 2006. A plataforma foi concebida para realização de simulações biologicamente realistas do funcionamento das redes neuronais do cérebro.

Há diferentes simuladores disponíveis para diversos níveis de estudo. Desde simuladores voltados ao estudo do funcionamento de um único neurônio e suas estruturas celulares até ferramentas que visam simular esquemas psicológicos ou redes semânticas. A ferramenta EMERGENT e o algoritmo LEABRA foram desenvolvidos com foco na simulação de estruturas cerebrais, seu funcionamento e suas interligações.

Deve-se diferenciá-lo de outras ferramentas que objetivam simular com mais detalhes cada célula individualmente. No LEABRA, cada neurônio artificial representa um conjunto de neurônios cerebrais e o nível de ativação de cada unidade do LEABRA representa o número de neurônios ativos e o grau de ativação de um pequeno grupo de células cerebrais com

características semelhantes. O LEABRA também não visa simular esquemas psicológicos ou redes semânticas. As representações e o aprendizado no LEABRA são difusos e estão espalhados nas conexões da rede.

O *Emergent* traz implementados, em seu escopo, diferentes algoritmos de simulação neural, dentre os quais, o LEABRA (*Local, Error-driven and Associative, Biologically Realistic Algorithm*) destaca-se por ser o mais utilizado. O LEABRA possui duas características principais, que merecem ser mencionadas (O'Reily e Munakata, 2000).

A primeira característica é que, nas fases de treinamento, para realizar o ajuste dos pesos, o LEABRA utiliza uma mistura entre aprendizado hebbiano e aprendizado guiado por erro. A implementação desta combinação entre os dois tipos de aprendizado se dá segundo a simples equação abaixo. Onde  $\Delta w_{ik}$  é a modificação aplicada a cada peso;  $k$  é uma variável parametrizável entre zero e um que indica a proporção de aprendizado hebbiano que deve ser utilizada;  $\Delta_{hebb}$  é o valor de correção do peso calculado segundo a regra de hebb e  $\Delta_{err}$  é o valor calculado segundo a aprendizagem supervisionada pela regra de backpropagation.

$$\Delta w_{ik} = k(\Delta_{hebb}) + (1 - k)(\Delta_{err})$$

Como a proporção em que cada tipo de aprendizado afetará o ajuste dos pesos é parametrizável, Varella (2006) testou diferentes valores. O presente experimento utiliza 1% de aprendizado hebbiano, conforme os achados de Varella (2006) recomendam.

A segunda é que utiliza a técnica K winners take all (KWTA) para emular o fenômeno da inibição lateral. Inibição lateral é um fenômeno comum em grupos neuronais de todo o corpo, onde a ativação de um neurônio inibe a ativação de outros neurônios próximos a ele. Pode ser notado quando se compara a dor de ter arrancado um único fio de cabelo com a dor de ter alguns poucos fios próximos arrancados simultaneamente. A inibição lateral fará com

que a sensação causada por cada fio diminua a sensação dos adjacentes e vice-versa, suavizando a percepção final. Há também no cérebro, outros mecanismos de inibição que evitam uma hiper ativação geral, este sistema também está retratado pela limitação que o KWTA produz. A inibição lateral é um importante fator na atenção, pois a força de uma percepção ou representação inibe outras representações de serem processadas.

## 5.2. Modelo computacional proposto

O presente modelo propõe uma relação de mútua influência entre as estruturas cerebrais responsáveis pela emoção e pela atenção. Nele, a estrutura amigdaloide influencia o córtex pré-frontal indiretamente, por meio do giro do cíngulo anterior e dos córtices sensoriais. Em contrapartida, o córtex pré-frontal influencia o processamento emocional tanto indiretamente por meio dos córtices sensoriais como diretamente pela ativação das massas de células intersticiais da amígdala.

A construção do modelo computacional aqui proposto foi realizada tomando-se por base o modelo computacional de Araújo elaborado em 2008. Em adição ao modelo de amígdala e hipocampo, foi construído um modelo de Córtex pré-frontal. Este modelo executa atividades de atenção, inibindo estímulos não relevantes de acordo com os objetivos do organismo e com a valência emocional dos estímulos. A partir do modelo de Araújo, foram modificadas duas camadas e adicionadas outras três. Foram criadas dezessete novas projeções representando as projeções axonais que chegam às ou partem das novas camadas. Foram criadas novas entradas para a rede representando estímulos auditivos distratores. Modificações no código dos programas existentes foram implementadas a fim de conferir maior automatização aos testes e de excluir código desnecessário para facilitar seu entendimento por futuros usuários, além de conferir melhoria de desempenho.

### 5.2.1 Camadas

O presente modelo foi construído pela modificação e ampliação do projeto de Araújo (2008). Partindo-se do modelo de Araújo, foram modificadas duas camadas e adicionadas outras três.

As modificações realizadas nas camadas, dizem respeito ao acréscimo de duas unidades neuronais na camada ‘input auditivo’ como também na camada ‘tálamo auditivo’. Os neurônios adicionados representarão estímulos auditivos não relevantes para a tarefa. Esses estímulos distratores competem por processamento cerebral com os estímulos relevantes e podem até mesmo, por meio de competição lateral, apagar a representação dos estímulos relevantes, se forem mais intensos do que estes. Em laboratório, a presença de estímulos não relevantes costuma tornar o aprendizado mais lento ou mesmo impossível. Para evitar contaminação dos resultados, nos experimentos de aprendizagem, os animais são normalmente mantidos em caixas a prova de luz e de som. Assim, diminui-se fortemente os estímulos distratores, que só se farão presentes quando e se forem experimentalmente adicionados.

É papel do córtex pré-frontal influenciar o córtex sensorial e a amígdala para inibir a ativação de representações não relevantes. Foram então criadas camadas, representando o Córtex pré-frontal, e as estruturas que ele utiliza para se ligar à amígdala cerebelar: o giro do cíngulo anterior e a massa de células intercaladas da amígdala (MCI). O córtex foi modelado com 100 unidades neuronais, este número foi escolhido por ser maior que qualquer outra camada da rede já existente, representando o grande desenvolvimento do córtex pré-frontal em relação a todo o cérebro. O giro do cíngulo anterior (GCA) foi modelado com o pequeno número de 8 unidades neuronais, pois a tarefa comumente atribuída pela literatura



neurocientífica a esta estrutura é a de repasse e distribuição de informações e não de processamento. As células intercaladas foram modeladas com 16 unidades neuronais, de modo a simular grupos de baixa densidade de neurônios.

Tabela 1 - Número de unidades neuronais das novas camadas.

<b>Camada</b>	<b>Número de neurônios</b>
Córtex pré-frontal (CPF)	100
Massas de células intercaladas	16
Giro do Cíngulo Anterior	8

### 5.2.2. Conexões

No Emergent, uma projeção representa a presença de feixes de axônios indo de uma estrutura cerebral a outra. Uma projeção contém múltiplas conexões ligando cada unidade neuronal da camada de origem a cada outra unidade da camada de destino. Toda projeção deve estar relacionada a três objetos principais: o primeiro é a camada de origem, o segundo a camada de destino e o terceiro é o objeto chamado spec (significando especificações) que detêm as configurações básicas que regem todas as conexões contidas na projeção.

Foram criadas dezenove novas projeções entre as camadas da rede. A maior parte das novas projeções foi criada com a especificação (spec) padrão da ferramenta. Foi elaborado

ainda um spec modificado para as projeções que modelam axônios que utilizam o ácido gama-aminobutírico (GABA) como neurotransmissor. As projeções do tipo GABA são projeções inibitórias e, para representá-las, foi criado um novo tipo de spec chamado “GABA” o qual define uma conexão como necessariamente inibitória.

Para testar os efeitos de projeções inibitórias sobre o foco atencional, foi realizado um teste preliminar com uma rede de quatro camadas. Nesse teste, a camada de entrada possui 8 unidades neuronais e a de saída 4. Foram apresentados dez padrões aleatórios à camada de entrada, e exigido como alvo que a saída apresentasse sempre os mesmos valores dos 4 primeiros neurônios da entrada ignorando os últimos 4 completamente. Além da camada escondida tradicional, foi adicionada uma camada de filtro atencional que recebe projeções das camadas de saída e da escondida. A camada filtro atencional envia projeções para a camada escondida. Essa projeção foi testada, para valores excitatórios e inibitórios. Foram testados dois grupos, cada um contendo 50 batches iniciados aleatoriamente. O grupo cuja projeção da camada filtro atencional para a camada escondida é de caráter excitatório necessitou de em média 7,9 épocas para atingir erro zero. Já as redes em que tal projeção é inibitória tiveram notadamente melhor desempenho com média de 6,78 épocas para convergir.

No modelo definitivo, as novas conexões foram criadas conforme indicado na Tabela 2, a saber: O Córtex Pré-frontal (CPF) recebe projeções do Giro do cíngulo anterior (GCA) e dos córtices auditivo e somestésico. O GCA recebe projeção do núcleo Central da amígdala. A massa de células intersticiais (MCI) recebe conexão dos três núcleos amigalóides e do CPF. O núcleo lateral recebe duas conexões inibitórias, uma direto do CPF e outra oriunda da MCI. O núcleo Central recebe uma projeção inibitória vinda da MCI, tal como o núcleo Basal. Os córtices auditivo e somestésico recebem projeções do CPF e enviam projeções para o núcleo basal. Todas as camadas da rede mantêm ainda as demais projeções que já existiam no modelo de Araújo.

Tabela 2 - Projeções adicionadas à rede de Araújo.

\ Chegada Origem \	CPF	GCA	MCI	Amígdala Lateral	Amígdala Central	Amígdala Basal	Córtex auditivo	Córtex somestésico
CPF	-	-	padrão	inibitória	-	-	padrão	padrão
GCA	padrão	-	-	-	-	-	-	-
MCI	-	-	-	inibitória	inibitória	inibitória	-	-
Amígdala Lateral	-	-	padrão	-	padrão; já existente	padrão	-	-
Amígdala Central	-	padrão	padrão	-		-	padrão	padrão
Amígdala Basal	-	-	padrão	-	padrão; já existente	-	-	-
Córtex auditivo	padrão	-	-	Padrão, já existente	padrão	-	-	-
Córtex somestésico	padrão	-	-	Padrão, já existente	padrão	-	-	-

### 5.2.3. Entradas e Saídas

As matrizes de entrada do modelo atual foram criadas de forma a adicionar dados não relevantes para a tarefa às matrizes de estímulos auditivos previamente existentes. Uma nova coluna foi adicionada às matrizes de estímulo auditivo permitindo a introdução de até dois tipos de estímulos distratores. Devido à maior complexidade do problema, o número de exemplos apresentados ao modelo foi aumentado, a fim de permitir a generalização por parte da rede dos novos estímulos. O pareamento com as matrizes de estímulo somestésico e de contexto permaneceu o mesmo de Araújo (2008). A Figura 11 ilustra o acréscimo de uma coluna às matrizes de estímulo auditivo gerando diferentes versões de uma mesma matriz original. Todas essas versões deverão ser tratadas pela rede de forma semelhante para que a

tarefa proposta, a saber, o estabelecimento de associação entre um estímulo auditivo e um estímulo somestésico em determinado contexto, possa ser realizada.

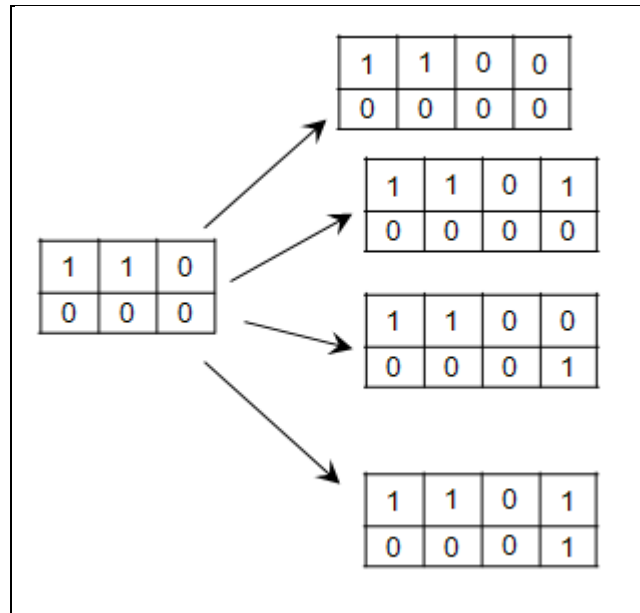


Figura 11 - Adição de informações irrelevantes às matrizes de estímulo auditivo.

A rede passou pelos mesmos (dois) estágios de treinamento de Varella (2006) e Araújo (2008). O primeiro estágio representa a própria ontogênese cerebral onde são construídas as respostas inatas do organismo. Nesse estágio é apresentado à rede somente o estímulo somestésico. O estímulo incondicionado (EI) é apresentado à camada de entrada ao mesmo tempo que a resposta incondicionada (RI) desejada (resposta de medo) é exibida como alvo para a camada de saída.

Na segunda fase de aprendizado, são apresentadas à rede duas diferentes entradas de contexto: contexto A e contexto B. Cada contexto irá ser acompanhado de uma relação diferente entre os estímulos auditivo e somestésico. O objetivo é que a rede aprenda a ignorar

os estímulos distratores e comporte-se diante de um determinado som, da mesma forma que agiria diante do estímulo somestésico incondicionado, somente no Contexto A e não no Contexto B. Portanto, apresentamos, no Contexto A, os estímulos auditivos, pareados com o EI. Sempre que, e somente quando, o estímulo incondicionado gerador de medo (EI) for apresentado, haverá também a apresentação de um estímulo auditivo específico. De outra forma, quando a matriz de entrada de contexto apresentada for o contexto B, o estímulo auditivo relevante é apresentado sem estar pareado pelo estímulo somestésico gerador de medo. Exemplos de pareamentos semelhantes são apresentados à rede com a presença diferentes estímulos distratores, a fim de que a rede aprenda a ignorá-los.

A Figura 12, a seguir, exhibe a visualização fornecida pela ferramenta *Emergent* da rede em funcionamento. A imagem foi gerada ao final da fase de treinamento. Na figura, as camadas de entrada da rede (abaixo, da esquerda para a direita) estão recebendo o contexto A, o estímulo sonoro condicionado junto a um estímulo distrator e o estímulo somestésico. A camada de saída (acima) apresenta a saída de medo. As linhas verdes indicam projeções inibitórias e as amarelas projeções excitatórias.

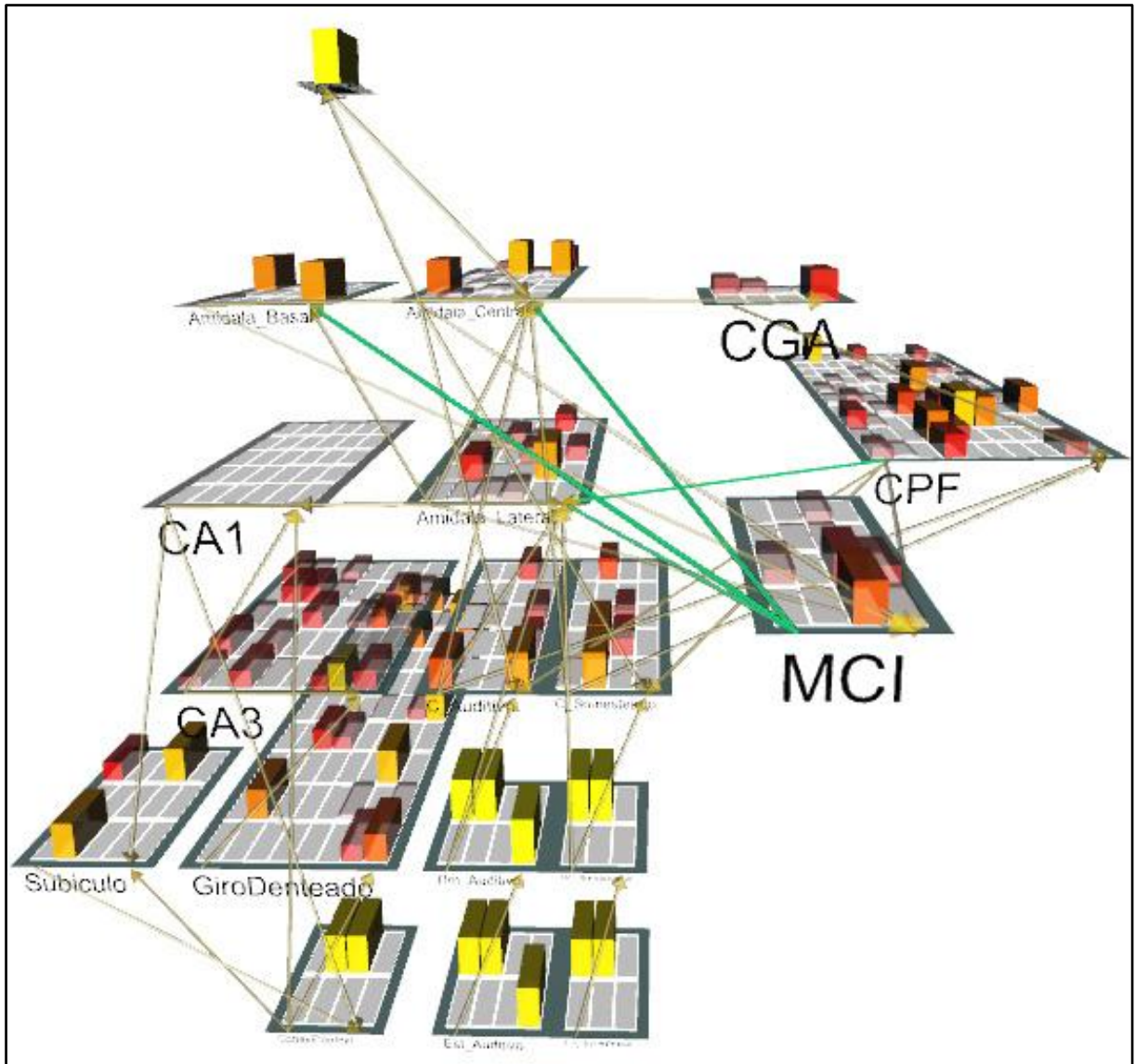


Figura 12 - Rede contendo amígdala, hipocampo e córtex pré frontal.

#### 5.2.4. Modificações nos programas

Para permitir maior facilidade na execução de testes em grande escala, foram realizadas algumas modificações nos programas já existentes.

O primeiro programa modificado foi o “TreinamentoCompleto”. Este programa é responsável por criar e controlar os batches e, a cada batch, ele é responsável por chamar em seqüência as duas fases de treinamento – fase de ambientação e fase de condicionamento -

executadas durante os testes realizados. Ao código do programa “TreinamentoCompleto” acrescentou-se uma chamada ao método “Init\_Weights()”. Este é um método que já vem pronto na ferramenta *Emergent* e que serve para inicializar os pesos da rede. A chamada foi adicionada dentro do loop principal do programa e tem o objetivo de reiniciar os pesos da rede de forma aleatória e automática a cada novo Batch, não exigindo nenhum tipo de interação humana para tal. A Figura 13 mostra o código do programa “TreinamentoCompleto” conforme exibido pela interface gráfica da ferramenta *Emergent*. Observa-se destacada em azul a linha de código acrescentada.

```

TreinamentoCompleto
├── objs
├── types
├── args
├── vars
├── functions
├── init_code
├── prog_code
├── Net Counter Init: batch
├── while (batch < max_batch)
│   └── loop_code
│       └── network->Init_Weights()
│           Print: "Chamando a ambi..."
│           └── Call Ambientacao(networ...)
│               Print: "Chamando o condi..."
│               └── Call Condicionamento(net...)
│                   Net Counter Incr: batch

```

Figura 13 - programa TreinamentoCompleto

Outras modificações de menor importância foram implementadas nos programas “Ambientação” e “Condicionamento” os quais controlam cada um a execução da fase de treinamento de mesmo nome. Removeu-se a caixa de diálogo que aparecia no início da fase de condicionamento. Este *prompt* perguntava se o usuário queria que os pesos fossem inicializados. Como a ação de inicializar os pesos já havia sido apagada do código do

programa condicionamento por Araújo, esta caixa de diálogo já não possuía mais nenhuma utilidade.

A caixa de diálogo semelhante contida no programa ‘Condicionamento’ também foi excluída do código. Deixou-se incorporado ao restante do programa apenas os procedimentos relativos à opção ‘sim’. O objetivo dessas alterações foram diminuir da necessidade de interação humana durante os testes, facilitar a leitura do código por futuros usuários e melhorar o desempenho. Optou-se por manter uma chamada ao `InitWeights()` no código da ambientação por entender-se que nem sempre este programa será chamado pelo ‘TreinamentoCompleto’.

### 5.3. Testes realizados

Para a realização dos testes, a rede foi iniciada e treinada cinquenta vezes (50 batches). A cada batch, o peso inicial das conexões é estabelecido aleatoriamente. Os valores dos pesos são sorteados segundo uma curva normal com média 0,5 e desvio padrão 0,25.

Cada batch foi submetido à fase de ambientação e, na sequência, à fase de condicionamento. Foi medido o somatório do erro quadrático ao fim de cada época de cada batch e foi avaliado o número de épocas necessário a cada batch até que o somatório do erro quadrático seja igual a zero nas fases de ambientação e posteriormente de condicionamento.

### 5.4. Resultados e análises

O modelo convergiu em 100% dos casos, atingindo erro zero tanto na fase de ambientação como na de condicionamento.



Ao analisar-se o erro inicial das redes, percebe-se que quase a totalidade delas inicia a fase de ambientação com erro próximo de 90%. Isso ocorre porque os critérios adotados para geração aleatória dos pesos levaram a estados iniciais nos quais a rede responde com medo diante de todos os estímulos apresentados. Conforme as saídas alvo dos exemplos apresentados durante a fase de ambientação são constituídas por 90% de respostas de não medo e 10% de medo, o índice de acerto para uma rede que inicialmente responde sempre com medo se iguala à proporção de 10%.

Na Tabela 3 pode ser visto o número médio de épocas necessário em cada fase de treinamento.

Tabela 3 - Número médio de épocas gasto em cada fase do treinamento.

<b>Média das épocas necessárias para convergir</b>		
<b>ambientação</b>	<b>condicionamento</b>	<b>total</b>
9,6	6,4	15,9

Em média, para cada batch, foram necessárias 15,9 épocas para o aprendizado total, o desvio padrão foi de 12,1 e a mediana foi de 11 épocas. Em média foram gastas 9,5 épocas na fase de ambientação e 6,4 épocas na fase de condicionamento.

Percebe-se que foi necessário um número menor de épocas para o presente modelo convergir do que no modelo de Araújo. Isso se deve ao número expressivamente maior de exemplos que são apresentados ao atual modelo em cada época, a fim de permitir a correta generalização dos estímulos distratores. Não se deve, portanto assumir que se trata de uma melhora de desempenho dado que a complexidade das tarefas e o número de exemplos apresentados por cada época são distintos. A Tabela 4 mostra o número de épocas necessário para que cada Batch convergisse.

Tabela 4 - Número de épocas gastas por cada Batch nas fases de ambientação e condicionamento.

Batch	Épocas necessárias para convergir		
	ambientação	condicionamento	total
1	12	1	13
2	7	4	11
3	8	2	10
4	20	47	67
5	13	2	15
6	5	1	6
7	10	16	26
8	11	2	13
9	7	2	9
10	6	4	10
11	5	2	7
12	12	1	13
13	6	5	11
14	7	4	11
15	27	6	33
16	28	2	30
17	4	2	6
18	14	2	16
19	8	3	11
20	5	4	9
21	4	17	21
22	6	3	9
23	6	1	7
24	14	21	35
25	6	5	11
26	6	1	7
27	11	3	14
28	10	4	14
29	10	12	22
30	10	4	14
31	12	20	32
32	5	3	8
33	27	3	30
34	22	1	23
35	7	3	10
36	18	5	23
37	5	2	7
38	4	1	5
39	10	2	12
40	6	1	7
41	5	45	50

42	6	3	9
43	9	1	10
44	6	1	7
45	7	1	8
46	4	2	6
47	4	1	5
48	5	23	28
49	11	10	21
50	6	7	13

Em relação aos experimentos de Araújo (2008) a proporção entre as duas fases de treinamento, mostrava que a fase de ambientação exige um número muito maior de épocas que a fase de condicionamento. Embora esta superioridade tenha se mantido, a relação entre ambas encontra-se mais equilibrada no presente estudo do que no trabalho anterior, tendo passado de uma proporção de 3/1 em Araújo para uma proporção de 3/2. Tal fenômeno ocorre porque o real aumento de complexidade na tarefa ocorreu na fase de condicionamento permanecendo a fase de ambientação sem sofrer grandes modificações.

O gráfico seguinte apresenta o número de épocas que as redes levaram para convergir e as frequências com que cada número de épocas ocorreu.

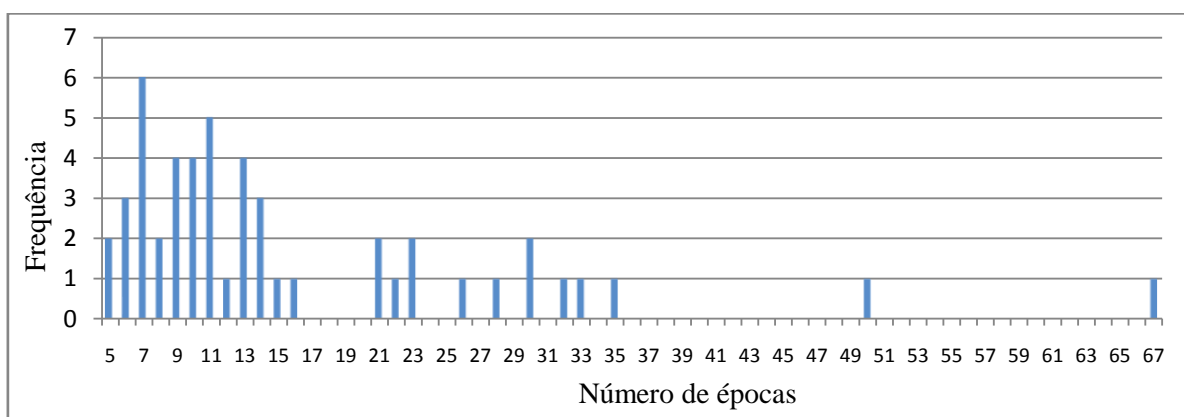


Figura 14 - Número de épocas necessárias para cada Batch convergir pela frequência em que ocorreram.

Quanto ao número de épocas necessário para convergir, observa-se que os batches formaram dois grupos: a maioria (72%) das redes convergiu em entre 5 e 16 épocas enquanto um segundo grupo composto por 24% dos casos convergiu em entre 21 e 35 épocas.

Notam-se ainda dois batches destacados dos demais, custando 50 e 67 épocas para convergir. Em ambas as redes, tal demora ocorreu por conta de uma longa fase de condicionamento, permanecendo a fase de ambientação dentro de valores mais comuns ao restante da amostra. A análise dos gráficos de decaimento do erro quadrático destes dois batches sugeriu a ocorrência de um ou mais mínimos locais, ou seja, o sistema teria atingido um estado em que todos os estados próximos possuem erro quadrático maior que ele, promovendo um ciclo vicioso de alterações nos pesos com o erro subindo e descendo sucessivamente pelas épocas.

As curvas de aprendizado apresentadas por cada batch podem ser classificadas em três tipos de comportamentos: a) na maioria dos batches (72%), após convergir na fase de ambientação, observando-se o valor do erro na primeira época da fase de condicionamento, nota-se que este valor volta a subir de zero para uma média de 11%, caindo para zero novamente dentro de poucas épocas seguintes; b) em 24% dos casos, tal fenômeno não ocorre, encontrando-se os batches já treinados ao final de uma única época de condicionamento e; c) em 4% dos casos o erro subiu pouco como de costume, entretanto, a despeito disso, a fase de condicionamento foi anormalmente longa.

## Capítulo 6

### Conclusão

A construção de modelos teóricos ou modelos físicos em escala já é utilizada pelas ciências desde o seu surgimento. O advento da computação abriu uma gama de novas possibilidades com a construção de modelos dinâmicos, mensuráveis, versáteis e mais baratos. A neurociência computacional aproveita-se de tais benefícios para explorar o funcionamento cerebral e traz, em especial, a vantagem de não submeter seres vivos a experimentos dolorosos.

A pesquisa em neurociências é importante ferramenta para promoção de diagnósticos e tratamentos mais eficazes. É também útil à computação, pois trata de temas caros à inteligência computacional tais como reconhecimento de padrões e adaptabilidade.

Varella elaborou um primeiro modelo, baseado no algoritmo LEABRA, que representava as teorias sobre o funcionamento fisiológico da formação do condicionamento aversivo. Seu modelo tem na amígdala a principal responsável pelo aprendizado emocional e representa as duas rotas de chegada de informações à amígdala, a rota curta que vai direto do tálamo ao núcleo lateral amidalóide e a rota longa que vai do tálamo ao córtex e de lá ao núcleo lateral.

Araújo ampliou este modelo e adicionou à arquitetura de Varella estruturas hipocâmpais. A rede criada passa a ser capaz de tratar não apenas de pistas isoladas como fazia Varella, mas também de informações contextuais.

Pesquisas com novas drogas permitiram que Wilensky e colegas realizassem testes mais minuciosos dos núcleos amidalóides. Os experimentos evidenciaram a importância das

projeções entre os córtices sensoriais e o núcleo central na formação mnêmica emocional. Tais ligações não haviam sido contempladas nos modelos de Varella e Araújo.

A presente pesquisa se alicerça sobre os modelos de Varella e Araújo e dá alguns passos adiante, ampliando os modelos anteriores e atualizando-os de acordo com as teorias mais recentes. Seguindo os indícios encontrados em laboratório, uma nova configuração foi testada a partir do modelo de Araújo. Testes foram realizados comparando a configuração original com a nova e indicaram que as modificações aprimoraram seu funcionamento. As mesmas modificações, ou seja, o acréscimo de projeções oriundas do córtex somestésico e do córtex auditivo direcionadas ao núcleo central da amígdala, foram posteriormente incluídas no modelo final já contendo o córtex pré-frontal. Os resultados da comparação entre o modelo com e o sem essas duas conexões também foram positivos, corroborando novamente os achados laboratoriais obtidos por Wilensky que ressaltam a importância de tais projeções.

Para representar o funcionamento da atenção na seleção de estímulos que devem ou não ser processados pelo cérebro, foi adicionado ao modelo de uma nova camada representando o córtex pré-frontal (CPF). De acordo com as indicações encontradas na literatura, foram adicionadas duas outras camadas representando o giro do cíngulo anterior e as massas de células intersticiais da amígdala cerebelar. Foram também criadas diversas conexões representando as ligações entre o CPF e as regiões responsáveis pelo condicionamento de medo.

O modelo resultante foi capaz de aprender a relação entre os estímulos e de lidar com os novos estímulos distratores, os quais foram adicionados a fim de exigir da rede neural artificial a habilidade de focar a atenção nas informações relevantes para a tarefa, ignorando as demais. Esses achados corroboram o papel do CPF já proposto pela literatura, semelhante a um maestro conectando-se a diversas áreas simultaneamente e assumindo funções de direcionamento e coordenação.

Os resultados também corroboram a visão de que o principal meio de atuação do CPF sobre a amígdala é por meio de comunicações que direta ou indiretamente são inibitórias e que tais ajudam no controle do processamento de estímulos irrelevantes.

O tratamento que o cérebro dá à quantidade excessiva de estímulos sensoriais internos e externos que lhe chegam é impressionante e pode servir de exemplo e inspiração para a construção de software ou demais engenhos computacionais. A presente pesquisa e o estudo do modelo aqui construído podem ajudar na construção de outros sistemas adaptativos com habilidade de distinguir entre informações relevantes e lixo informacional. As aplicações práticas de tal habilidade permitirão o tratamento de quantidades maiores de dados com menor exigência de recursos. E, sendo um sistema adaptativo, pode-se eliminar a necessidade de que o programador saiba de antemão quais critérios de decisão separam os dois grupos, permitindo que as explorações do próprio sistema o ensinem isso.

Uma limitação observada na presente estrutura é que ela não permite o estudo da flexibilidade da atenção. A atual formatação da rede não prevê mudanças de foco de atenção após o treinamento estar completo. Para tal pode-se incluir em trabalhos futuros mais uma camada de entrada a qual indicaria a região do campo perceptivo que deve ser priorizada.

Outra limitação é que todos os estímulos são apresentados sempre em um mesmo instante do tempo. Situações em que há separação temporal entre os diferentes estímulos não podem ser estudadas com o atual modelo. Isto ocorre por que a ativação da rede sempre “zera” entre um ciclo e outro. Para permitir tais estudos, pode-se, no futuro, incluir valores intermediários de decaimento na ativação, assim a quantidade de decaimento ocorrido simularia o espaço de tempo entre a apresentação dos estímulos.

Possíveis trabalhos futuros incluem o uso do modelo para estudo da extinção do condicionamento de medo. Há muitas relações entre a inibição gerada pelo controle atencional e a inibição necessária à extinção do condicionamento aversivo. As mesmas

estruturas e conexões neuronais podem ser usadas para explicar satisfatoriamente o funcionamento de ambos os fenômenos. O presente modelo pode ser usado, portanto, para elucidar as similaridades e diferenças entre as duas funções cerebrais.

Os próximos estudos podem incluir também experimentos laboratoriais. Pode-se colocar os animais em situações nas quais o som que serve de pista para o estímulo aversivo é apresentado juntamente com outros estímulos aleatórios. Mediante o uso de fármacos ou de destruição mecânica, poderá ser verificado se a inibição das vias de comunicação aqui representadas impedem o condicionamento aversivo em tal situação.

O estudo do cérebro e a construção de sistemas computacionais não convencionais constituem duas regiões de fronteira para o atual estágio do conhecimento que temos sobre o mundo. Espera-se que este trabalho, tenha contribuído com mais uma pequena pedra para a edificação do patrimônio que toda nossa raça tem construído desde seu surgimento e que, por isso mesmo, é propriedade de todos.



## Referências

AISA, B., MINGUS, B., AND O'REILLY, R. - **The emergent neural modeling system.**, Neural Networks, 21, 1045-1212., 2008.

ARAÚJO, E. P. - **Modelagem computacional do condicionamento por medo.** Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Núcleo de Computação Eletrônica, Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BRANDAO, Marcus Lira et al . **Organização neural de diferentes tipos de medo e suas implicações na ansiedade.**, Revista Brasileira de Psiquiatria, vol.25, suplemento 2, São Paulo, 2003.

DAMASIO, Antonio, - **A second chance for emotion** in LANE & NADEL, Cognitive Neuroscience of Emotion, OUP, 2000.

ERTHAL, F. S., OLIVEIRA, L., MACHADO-PINHERO, W. PESSOA, L. & VOLCHAN, E. . **Captura da atenção por estímulos emocionais.** Cadernos de Psicologia e Educação, 14(27), 35-44, 2004.

ESPERIDIAO-ANTONIO, Vanderson et al . **Neurobiologia das emoções.** Rev. psiquiatr. clín., São Paulo, v. 35, n. 2, 2008 .

HAZY T.E, FRANK M.J, O'REILLY R.C. **Toward an executive without a homunculus: computational models of the prefrontal cortex/basal ganglia system.** Phil. Trans. R. Soc. B 362 1601–1613. 2007.

ILACHINSKI, **Cellular automata. A discrete universe**, ed. World Scientific, Singapore, 2001.

LABATUT, V., PASTOR, J., RUFF, S., DE MONET, J, CELSIS, P., **Cerebral modeling and dynamic Bayesian networks**, Artificial Intelligence in Medicine, n30, p.119–139, 2004.

LEDOUX, J. - **O Cérebro Emocional**, Objetiva, 1998.

LENT, - **Cem bilhões de neurônios : conceitos fundamentais de neurociência**, São Paulo : Atheneu, 2004.

LURIA, A. R.. **Curso de Psicologia geral: Atenção e Memória** (volume III). Rio de Janeiro: Editora Cívica Brasileira, 1979.

LYTTON, HELLMAN, SUTULA, - **Computer models of hippocampal circuit changes of the kindling model of epilepsy**, Artificial Intelligence in Medicine n13, p 81–97, 1998.

MADUREIRA, Daniele Q.M.; CARVALHO, Luis Alfredo V. de; CHENIAUX, Elie. **Modelagem neurocomputacional do circuito tálamo-cortical: implicações para compreensão do transtorno de déficit de atenção e hiperatividade**. Arq. Neuro-Psiquiatr., São Paulo, v. 65, n. 4a, Dec. 2007

O'REILLY, R. C. e MUNAKATA, Y., **Computational Explorations in Cognitive Neuroscience**, MIT Press, Cambridge, MA, 2000.

O'REILLY, R. C. **Biologically Based Computational Models of High-Level Cognition**. Science, Vol. 314, no.5796, páginas.91-94, 2006.

PARIÈS, De Jean, - **Complexity, Emergence, Resilience...**, in HOLLNAGEL, Erik (editor), Resilience Engineering, Ashgate Publishing, 2006.

PESSOA, Luiz. **How do emotion and motivation direct executive control?**. Elsevier, 2009.

ROUGIER, NOELLE, BRAVER, COHEN, O'REILLY, - **Prefrontal cortex and flexible cognitive control: Rules without symbols**, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States, 102:7338-7343, 2005

SOTRES-BAYON, CAIN e LEDOUX, **BrainMechanisms of Fear Extinction: Historical Perspectives on the Contribution of Prefrontal Cortex**, Society of Biological Psychiatry, 60 p329-326, 2006.

STERN, Peter e TRAVIS, John. **Of bytes and brains**. Science, Vol. 314, no.5796, página.75, 2006.

VARELLA, A. V. S.- **Uma abordagem computacional e conexionista sobre o sistema de memória emocional**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Núcleo de Computação Eletrônica, Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

VUILLEUMIER, DRIVER, **Modulation of visual processing by attention and emotion: windows on causal interactions between human brain regions**, Phil. Trans. R. Soc. B(2007) 362, 837–855, published online, 2007.

WILENSKY, SCHAFE, KRISTENSEN, LEDOUX, **Rethinking the Fear Circuit: The Central Nucleus of the Amygdala Is Required for the Acquisition, Consolidation, and Expression of Pavlovian Fear Conditioning**, The Journal of Neuroscience, 2006.