

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS E TEORIA DA COMPUTAÇÃO
APLICADOS À MODELAGEM DOS PROCESSOS EMOCIONAIS HUMANOS

Flávio Luis de Mello

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS DE COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:



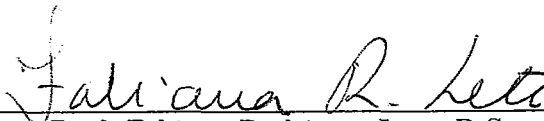
Prof. Antônio Alberto Fernandes de Oliveira, D.Sc.



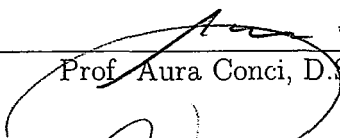
Prof. Edilberto Strauss, Ph.D.



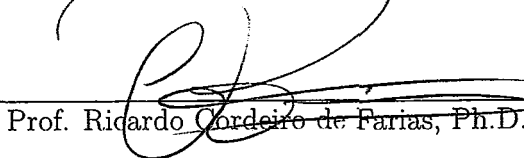
Prof. Luís Alfredo Vidal de Carvalho, D.Sc.



Prof. Fabiana Rodrigues Leta, D.Sc.



Prof. Aura Conci, D.Sc.



Prof. Ricardo Cordeiro de Farias, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2006

MELLO, FLÁVIO LUIS DE

Processamento Digital de Imagens
e Teoria da Computação Aplicados à
Modelagem dos Processos Emocionais
Humanos [Rio de Janeiro]2006

XI, 133 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
D.Sc., Engenharia de Sistemas e de
Computação, 2006)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

- 1.Processamento Digital de Imagens
- 2.Ativação Cerebral 3.Emoção
- 4.Ressonância Magnética Funcional
- 5.Teoria dos Jogos 6.Neurociência
Computacional 7.Computabilidade
- 8.Máquina de Turing

I.COPPE/UFRJ II.Título (série)

Agradecimentos

A Edilberto Strauss, orientador, pelo empenho que dedicou a este trabalho, pelos conselhos oportunos em momentos decisivos da consecução da pesquisa e pela confiança que depositou em mim desde o início dos trabalhos.

A Antônio Alberto Fernandes de Oliveira, orientador, pela certeza em meu sucesso e pela sabedoria com que conduziu esta empreitada.

A meus pais, por tudo que sou hoje.

A minha esposa, pelo seu amor e incentivo, e pela abnegação com que abdicou de muitas comodidades e assumiu tarefas que me cabiam.

A Luiz Felipe Coutinho Ferreira da Silva, pelo papel decisivo em minha formação científica, pelo companheirismo e pelas sugestões oportunas.

Ao Laboratório de Computação Gráfica (LCG-COPPE/UFRJ), por ter proporcionado mais esta oportunidade de evoluir em minha formação.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS E TEORIA DA COMPUTAÇÃO
APLICADOS À MODELAGEM DOS PROCESSOS EMOCIONAIS HUMANOS

Flávio Luis de Mello

Maio/2006

Orientador: Antônio Alberto Fernandes de Oliveira

Edilberto Strauss

Programa de Engenharia em Sistemas e Computação

A emoção e razão são as funções mais complexas de que o cérebro humano é capaz de produzir. Durante o dia-a-dia o ser humano é constantemente estimulado a ativar operações mentais relacionadas com a razão e emoção, sendo diferentes os mecanismos neurais que correspondem a cada operação mental. A ciência pouco conhece sobre esta mecânica, exceto que algumas regiões estão relacionadas com determinadas emoções. Entende-se não basta simplesmente enumerar as relações <processo mental, área de ativação>, tal como é feito atualmente. Existe uma necessidade de esclarecer os aspectos relacionados com a mecânica de funcionamento deste processo. Neste sentido, a presente Tese é uma complementação dos estudos anteriores, buscando avançar na compreensão do funcionamento do processo de ativação cerebral. Ela é uma procura pela resposta à questão do cérebro humano como um objeto computável. O objetivo geral é criar um modelo computacional capaz de sistematizar o processo de ativação cerebral humano para um conjunto limitado de estímulos. Desta forma, havendo uma Máquina de Turing reconhecadora de padrões de ativação cerebral, também existirá um resolutor capaz de desempenhar a mesma funcionalidade. A partir de então é possível realizar afirmações sobre a questão da solucionabilidade e da computabilidade do problema.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DIGITAL IMAGE PROCESSING AND COMPUTER THEORY APPLIED TO
HUMAN EMOTIONAL PROCESS MODEL

Flávio Luis de Mello

May/2006

Advisor: Antônio Alberto Fernandes de Oliveira
Edilberto Strauss

Department: Systems and Computer Engineering

The emotion and reason are the most complex functions that the human brain is capable to produce. During day-by-day, the human being is constantly stimulated to activate mental operations associated to reason and emotion, and there are different neural mechanisms that correspond to each mental operation. Science lacks of knowledge on these mechanics, except that it is notorious that some regions are related to particular emotions. However, modern studies should not be limited to enumerate the relationship <mental process,activation area>, such as current researches do. They should try to explain the brain functioning process obscure aspects. On this point of view, this Thesis is a previous studies complementation, trying to contribute for a better understanding of the cerebral activation process functioning. It looks for features that indicate if the human brain might be considered a computable object. So, the general goal is to create a computational model that is capable systemize the cerebral activation human process for a limited set of stimulations. By constructing a pattern cerebral activation recognizer Turing Machine, it is possible to assert that exists a computer algorithm, which can perform the same functionality. Hence, it is possible to perform well-founded hypothesis over human brain computability and solutionability.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Tema, Delimitação e Localização	1
1.2	Justificativa e Objetivos	2
1.3	Metodologia	3
1.4	Descrição da Tese	4
2	Teoria dos Jogos	6
2.1	Fundamentos e Limites da Teoria	6
2.2	Racionalidade	9
2.3	Modelagem de um Jogo	12
2.4	Jogo de Informação Completa	15
2.5	O Equilíbrio de Nash	18
2.6	Jogo Seqüencial	20
2.7	O Jogo do Ultimato	22
3	Neurociência	25
3.1	O Universo Chamado Neurociência	26
3.2	O Sistema Nervoso	28
3.3	Mapeamento Funcional do Sistema Nervoso	33
3.4	Localização Espacial no Domínio Cerebral	37
3.5	Emoções	42
3.6	A Psicanálise e as Neurociências	46
4	Ressonância Magnética	50
4.1	Imagens Médicas	50
4.2	Aparato Físico de Sistemas de RM	52

4.3	Construção das Imagens	58
4.4	Agentes de Contraste	62
4.5	Ressonância Magnética Funcional	64
4.6	As Controvérsias em Torno da Ressonância Magnética Funcional . . .	66
5	Estudo da Ativação Cerebral	70
5.1	Moral	72
5.2	Medo	76
5.3	Bancos de Dados de Neuroimagens	78
5.4	Modelos Computacionais	82
6	Metodologia	84
6.1	Descrição Geral	84
6.2	Coleta de Dados	87
6.3	Processamento da Imagem	89
6.4	Conversão de Coordenadas	90
6.5	Unificação	94
6.6	Extração de Heurísticas	95
6.7	Classificação	96
7	Resultados	98
7.1	Preparação dos Dados	98
7.2	Características do Conjunto de Dados	101
7.3	Construção do Sistema Formal Reconhecedor	104
7.4	Análise dos Resultados	106
8	Conclusões e Trabalhos Futuros	111
	Bibliografia	115
A	Regiões de Ativação Segundo Estímulos Emocionais	130

Lista de Figuras

2.1	Jogo descrito na forma normal.	13
2.2	Jogo descrito na forma estendida	13
2.3	Tipos de conjuntos de informação	15
2.4	Estudo de caso para empresas com um determinado produto no mercado .	17
2.5	O jogo do comércio internacional	18
2.6	Definição do equilíbrio de Nash no jogo do comércio internacional	19
2.7	Representação de diversos subjogos	21
2.8	Aplicação da indução reversa	22
2.9	Representação do jogo do ultimato na forma extensiva	23
3.1	O sistema nervoso central e periférico do ser humano.	28
3.2	Divisões do cérebro chamadas lobos: frontal, parietal, occipital, temporal e insular.	32
3.3	Planos do cérebro: (a) Axial; (b) Sagital; (c) Coronal.	33
3.4	Áreas de Brodmann do córtex cerebral do homem: (a) e (c) vista lateral externa do hemisfério esquerdo; (b) e (d) vista lateral interna do hemisfério esquerdo. (imagens <i>a</i> e <i>b</i> extraídas de Eyzaguirre e Fidone [1], e imagens <i>c</i> e <i>d</i> extraídas de Kandel et alli [2])	38
3.5	Sistema de coordenadas de Talairach: (a) corte sagital evidenciando os pontos <i>AC</i> e <i>PC</i> , bem a linha horizontal de alinhamento <i>ACPC</i> ; (b) registro do sistema de coordenadas indicando o sentido dos eixos cartesianos. 40	
4.1	A soma dos campos gera um campo uniforme ao longo do eixo longitudinal de um aparelho de RM.	53
4.2	O campo uniformemente variado permite localizar espacialmente o objeto. 54	

4.3	Configurações de bobinas receptoras de RF: (a) Bobinas de Helmholtz utilizadas em exames de cervicais; (b) Bobinas em formato de gaiola para exames de cabeça e extremidades do corpo; (c) Bobinas em sandália utilizadas em exames de tornozelos; (d) Bobinas de superfície utilizadas para exames de objetos pequenos.	54
4.4	Um magneto com pólos norte e sul e um próton em movimento que se comporta como um magneto, produzindo seu próprio campo magnético em miniatura.	55
4.5	Orientação dos spins na ausência e na presença de campo magnético externo.	56
4.6	Efeitos do campo magnético sobre a frequência de precessão.	57
4.7	Processo de geração do sinal elétrico utilizado na construção da imagem de RM.	58
4.8	Largura da banda de transmissão e inclinação da rampa de gradiente versus espessura do corte.	59
4.9	Imagem de um paciente apresentando duas colunas vertebrais. (Fonte: Departamento de Radiologia do Hospital St. Paul, Canadá [3])	61
4.10	À esquerda uma imagem do coração obtida sem controle do movimento e a direita obtida com controle do movimento. (Fonte: Departamento de Radiologia do Hospital St. Paul, Canadá [3])	62
4.11	A imagem à esquerda exibe um corte do tórax onde a respiração do paciente provocou um efeito de borramento das estruturas internas. A imagem à direita exibe o mesmo corte, aumentando o NEX para 16. (Fonte: Departamento de Radiologia do Hospital St. Paul, Canadá [3])	63
4.12	A imagem à esquerda exibe um corte sem o uso de agentes de contraste, e à direita com o uso de agentes de contraste. (Fonte: Hospital St. Michael, Canadá [4])	63
4.13	Ativação cerebral resultante de um estímulo induzido. Cortes segundo os planos: (a) coronal; (b) transversal; (c) sagital. (Adaptado de Moll <i>et alii</i> [5])	66
5.1	Diagrama de <i>brainstorm</i> da revisão bibliográfica.	71

6.1	Diagrama de blocos da metodologia empregada no processamento das ativações cerebrais.	86
6.2	Processo de extrusão: (a) objetos iniciais que determinam as extremidades do objeto 3D desejado; (b) objeto 3D resultante da extrusão.	91
6.3	Determinação da posição relativa de um ponto segundo um dado volume.	92
6.4	Região não mapeada por Brodmann: (a) zona de vazio; (b) novos limites definidos segundo as subdivisões do sistema límbico.	93
6.5	Exemplo de ativação cerebral que materializa um possível estado de uma Máquina de Turing.	94
7.1	Imagens volumétricas: (a) imagem base do cérebro de um indivíduo; (b) áreas cerebrais ativadas.	99
7.2	Figura de ativação de uma região cerebral ilustrando a delimitação de uma ROI e o cálculo do centro matemático de ativação.	100
7.3	Processo de extrusão: (a) objetos iniciais que determinam as extremidades do objeto 3D desejado; (b) objeto 3D resultante da extrusão; (c) representação do encaixe do objeto 3D na imagem planar de regiões de ativação.	101
7.4	Cortes referentes as imagens planares utilizadas no processo de extrusão.	102
7.5	Valores estatísticos dos dados de RMf: (a) Quantitativo de dados associados ao conjunto de emoções selecionado; (b) Total de ativações por hemisfério cerebral; (c) Total de ativações nos volumes de Brodmann e no Sistema Límbico.	103
7.6	Autômato finito ilustrando as transições de estado de um sistema reconhecedor da emoção associada a raiva.	105
7.7	Cortes amostrais de uma imagem volumétrica representativa da ativação cerebral mediante um estímulo de medo.	108
7.8	Cortes amostrais de uma imagem volumétrica representativa da ativação cerebral mediante um estímulo de raiva.	110

Lista de Tabelas

3.1	Classificação hierárquica das grandes estruturas do sistema nervoso central	31
3.2	Enumeração de emoções primárias e secundárias.	45
6.1	Um estágio de ativação com seus respectivos centros matemáticos. . .	95
7.1	Consolidação dos dados de RMf utilizados na elaboração do Sistema Formal Reconhecedor.	102
7.2	Divisão dos dados estruturados pela fase de Unificação.	106
A.1	Amostragens da evocação de raiva evidenciando as regiões ativadas e seus respectivos estados de transição.	130
A.2	Amostragens da evocação de repugnância evidenciando as regiões ativadas e seus respectivos estados de transição.	131
A.3	Amostragens da evocação de alegria evidenciando as regiões ativadas e seus respectivos estados de transição.	132
A.4	Amostragens da evocação de tristeza evidenciando as regiões ativadas e seus respectivos estados de transição.	133
A.5	Amostragens da evocação de medo evidenciando as regiões ativadas e seus respectivos estados de transição.	134

Capítulo 1

Introdução

1.1 Tema, Delimitação e Localização

O tema de Tese é o estudo espacial do processo de ativação neural do ser humano mediante estímulos morais e emocionais. Neste sentido, pretende-se responder ao problema relacionado com a viabilidade em se criar um modelo computacional capaz de sistematizar o processo de ativação cerebral humano. A hipótese inicial é que se o processo de ativação é passível de tratamento sistemático, então pode ser proposto um modelo computacional que o descreva, ao menos parcialmente. Desta forma, em havendo uma Máquina de Turing reconhecedora de padrões de ativação cerebral, existirá também um algoritmo, ou resolutor, capaz de desempenhar a mesma funcionalidade. A partir de então é possível realizar afirmações sobre a questão da solucionabilidade e da computabilidade do problema.

Quanto à delimitação do problema, tem-se que o objeto de estudo é o cérebro humano de pessoas tidas como sadias. As excitações às quais elas serão submetidas tem por finalidade estimular seus sentimentos morais e emocionais. O modelo computacional está voltado ao processo mecânico, espacial e temporal da ativação cerebral, e não no processo químico, celular e psicológico.

Os primeiros estudos do funcionamento do cérebro datam do final do século XIX e enfatizam o entendimento das funções motoras do ser humano. Neste período, a pesquisa estava limitada pela dissecação de cadáveres o que obviamente era um fator impeditivo ao estudo. Com o advento dos exames não invasivos, tornou-se

possível conduzir a pesquisa em seres vivos, permitindo a análise da ativação cerebral segundo uma diversidade de estímulos motores, racionais, emocionais e morais. Este trabalho localiza-se neste último contexto, onde as técnicas avançadas de imageamento médico permitem uma investigação mais acurada do problema.

1.2 Justificativa e Objetivos

A emoção e razão são as funções mais complexas de que o cérebro humano é capaz de produzir. Durante o dia-a-dia, o ser humano é constantemente estimulado a ativar operações mentais relacionadas com a razão e emoção. Neste processo de ativação às vezes pode haver a predominância de uma operação mental sobre a outra.

Os mecanismos neurais que correspondem a cada operação mental são diferentes. Entretanto, a ciência muito pouco conhece sobre esta mecânica. Sabe-se que algumas regiões estão relacionadas com determinadas emoções. Contudo, não basta simplesmente enumerar as relações <processo mental, área de ativação>, tal como é feito atualmente. Entende-se que existe uma necessidade de esclarecer os aspectos obscuros relacionados com a mecânica de funcionamento deste processo.

Neste sentido, a presente Tese é uma complementação de estudos anteriores, buscando avançar na compreensão do funcionamento do processo de ativação cerebral, buscando materializar a questão sobre o cérebro humano como um objeto computável, segundo algumas condições de contorno. Sua originalidade reside no fato de não existirem modelos computacionais do processo mecânico, espacial e temporal da ativação cerebral sob a ótica da Teoria da Computação. Os modelos disponíveis até o momento estão associados ao processo químico e celular, tais como os modelos quantitativos de elementos finitos e as redes neurais, respectivamente. Assim, a importância deste trabalho está relacionada com a possibilidade de aplicar os resultados da Teoria da Computação ao cérebro humano.

O objetivo geral é, então, propor um modelo computacional capaz de sistematizar o processo de ativação cerebral humano para um conjunto limitado de estímulos. Desta forma, tem-se como objetivos específicos: (1) relacionar um conjunto de

estímulos morais e emocionais que serão tratados pelo modelo computacional; (2) construir um modelo tridimensional do cérebro humano que possibilite a representação espacial das áreas fisiológicas referentes ao estudo proposto, e; (3) elaborar um sistema formal capaz de deduzir uma determinada seqüência de entrada. Este sistema formal será um sistema reconhecedor.

1.3 Metodologia

Este trabalho irá utilizar a correlação funcional entre a atividade cerebral e os aspectos abstratos das emoções morais para a modelagem de um processo de tomada de decisão. A partir do uso da resposta BOLD (*Blood Oxygen Level Derived*) em imagens de ressonância funcional, se pretende estabelecer um modelo computacional que represente aspectos do comportamento decisório humano, para fins de identificação.

A correlação funcional entre a atividade cerebral e os aspectos abstratos das emoções morais durante a tomada de decisão, pode ser evidenciada pela análise da ativação temporal em imagens médicas de Ressonância Magnética funcional (RMf). O exame RMf faz uso da resposta BOLD para evidenciar as áreas do córtex humano que apresentam aumento significativo da atividade neural. Este aumento é especialmente caracterizado pela redução da taxa de oxigênio da hemoglobina, provocando a atenuação do sinal de Ressonância Magnética (RM).

Desta forma, através de ambientes interativos baseados nos aspectos estático e dinâmico de jogos interativos, situações envolvendo tomadas de decisões assistidas por computador, e ainda, com o apoio de equipamentos avançados de RM, deseja-se mensurar e analisar a ativação cerebral de um indivíduo (jogador). Assim, durante esses jogos interativos, o cérebro do indivíduo será monitorado e sua ativação avaliada a partir do uso de técnicas de processamento de imagens *online*. O procedimento proposto de análise permitirá uma modelagem mais eficiente da dinâmica evolutiva das emoções morais, otimizando a compreensão e o delineamento da fronteira de sentimentos dúbios.

As recentes evidências experimentais indicam que o comportamento sócio-moral do homem é baseado em circuitos cerebrais específicos, porém o mapeamento destes circuitos ainda encontra-se indefinido. A partir do processamento de imagens de RMf resultantes de estímulos cooperativos inseridos em jogos, pretende-se evidenciar o relacionamento entre as porções específicas do cérebro humano responsáveis pela gênese dos sentimentos morais e emocionais, a partir de ações cooperativas e não-cooperativas durante a dinâmica dos jogos.

O êxito deste trabalho está centrado na determinação de uma metodologia para a construção de um modelo computacional do cérebro humano relacionado com sentimentos morais e emocionais, segundo algumas hipóteses previamente definidas. Técnicas de Computação Gráfica e Processamento de Imagens são empregadas na construção do modelo computacional do processo de ativação cerebral proposto. As imagens de RMf, que sofrem o processamento, foram obtidas em bancos de imagens de domínio público.

1.4 Descrição da Tese

Pela característica multidisciplinar da Tese observa-se a necessidade de serem introduzidos diversos assuntos relacionados com o tema. Esta exigência se reflete diretamente sobre a estrutura do texto proposto, materializando-se através da redação de três capítulos teóricos. Entende-se que as condições propícias para apresentação do estado da arte sobre o assunto em questão, somente serão sedimentadas após a introdução destes capítulos. Desta forma, a Tese encontra-se organizada como se segue:

2. Teoria dos Jogos

Este capítulo tem por objetivo auxiliar na compreensão formal de situações de racionalismo para que então, seja possível estudar nos capítulos seguintes a questão do não racional e do emocional.

3. Neurociência

O Capítulo 3 descreve de forma sucinta a área de conhecimento descrita como

Neurociência. Nessa etapa serão apresentados os conceitos que irão facilitar o entendimento dos capítulos seguintes desta Tese.

4. Ressonância Magnética

A ênfase deste capítulo é contextualizar o uso de imagens médicas no estudo da atividade neural, e em particular, aquelas provenientes de exames de ressonância magnética funcional. Por fim, é realizada uma explanação sobre o uso da ressonância magnética na medição da ativação neural.

5. Estudo da Ativação Cerebral

Este capítulo apresenta o estado da arte associado à pesquisa sobre o estudo espacial do processo de ativação neural do ser humano, mediante estímulos morais e emocionais. Os trabalhos são resultado da combinação de diferentes técnicas utilizadas por diversas áreas de conhecimento.

6. Metodologia

O Capítulo 6 descreve a metodologia empregada na pesquisa com vistas à identificação de características próprias dos estados emocionais.

7. Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos, efetua a análise dos mesmos, e ainda, materializa a consecução da metodologia proposta. Também são descritas as decisões de projeto tomadas durante o andamento da pesquisa.

8. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta as conclusões gerais sobre a Tese, realiza especulações sobre os resultados, e ainda, propõe trabalhos futuros a serem realizados de modo a dar prosseguimento no estudo. Também são elencados os prováveis benefícios obtidos pela pesquisa.

Capítulo 2

Teoria dos Jogos

O termo *jogos* é um termo infeliz, porém já consolidado, para a descrição desta teoria pois carrega em si a lembrança de entretenimento. A Teoria dos Jogos busca modelar o relacionamento entre seres humanos, que a princípio, devem agir racionalmente. No contexto desta Tese, torna-se recomendável compreender formalmente estas situações de racionalismo, para que então, seja possível estudar nos capítulos seguintes a questão do não racional e do emocional.

2.1 Fundamentos e Limites da Teoria

A Teoria dos Jogos, ainda que em fase de amadurecimento, desperta grande interesse em razão de suas propriedades matemáticas inéditas e de suas múltiplas aplicações. Em ciências sociais, por exemplo, as aplicações vêm se tornando cada vez mais numerosas, pois a estrutura matemática da teoria difere profundamente das tentativas anteriores de propiciar fundamento matemático aos fenômenos sociais. Os primeiros esforços para compreender problemas sociais, econômicos e políticos foram feitos com base nas ciências físicas, inspirados no impressionante êxito por elas alcançado ao longo dos séculos. Entretanto, estes fenômenos estudados pela Teoria dos Jogos são diferentes daqueles estudados pelas Ciências Físicas. Os homens algumas vezes lutam uns contra os outros, e algumas vezes cooperam entre si, isto é, suas aspirações, em determinados contextos, podem conduzir ao conflito ou à colaboração.

Soma-se a este comportamento dual o fato de que os indivíduos, em geral, dispõem de diferentes graus de informação acerca de seus concorrentes, sejam estes abstratos ou não. A natureza inanimada, por sua vez, não exhibe esta característica. Átomos, moléculas, estrelas podem aglomerar-se, colidir, explodir, interagir, mas nunca se hostilizam ou colaboram entre si. Conseqüentemente, era de se duvidar que os métodos e conceitos desenvolvidos pelas Ciências Físicas pudessem lograr êxito quando aplicados aos problemas comportamentais [6].

O estudo da dinâmica evolutiva de jogos ditos estratégicos está relacionado com a tentativa de se compreender as expectativas e os comportamentos dos jogadores. Desta forma, espera-se com este estudo, otimizar a compreensão do processo de decisão de agentes humanos que interagem entre si. Este auxílio se dará através de duas maneiras: (1) a sistematização da capacidade de raciocinar estrategicamente; (2) a formalização das possibilidades de interação estratégica.

Neste sentido, é importante enfatizar que os resultados obtidos pela Teoria dos Jogos nem sempre correspondem à intuição. Nestes casos, deve-se realizar uma análise crítica do resultado, averiguando-se os possíveis motivos que o afastam do resultado esperado. Eventualmente, pode ser concluído que a intuição estava errada, ou ainda, constatar a existência de falhas e de simplificações indevidas na modelagem do problema.

Assim, a Teoria dos Jogos é uma formalização de uma metodologia para estudar os processos de tomada de decisão por parte de agentes que reconhecem sua interação mútua. Os fundamentos desta área de conhecimento foram descritos inicialmente por Von Neumann e Morgenstern em 1944, em seu livro intitulado *Theory of Games and Economic Behavior* [7]. Desde então, o campo de aplicação da Teoria dos Jogos vem sendo empregado continuamente em áreas adversas tais como em estratégias empresariais, ciências políticas, estratégias militares, etc.

Existem diversos tipos de jogos como, por exemplo, apostar na roleta de um cassino, apostar em um caça-níquel, etc. Este jogos são conhecidos como jogos de pura sorte. Observe que em jogos de pura sorte, não existem considerações

de natureza estratégica, desde de que não haja nenhum tipo de manipulação de resultado.

Analogamente, existem jogos que em sua essência envolvem apenas habilidade, como a disputa de uma prova de natação. Nestas situações, em sua base, também não existem considerações de natureza estratégica, uma vez que cada atleta deve, a cada tentativa, se esforçar para obter o melhor resultado. A Teoria dos Jogos estuda disputas de interesses que envolvem decisões estratégicas. Assim, Jogos de Pura Sorte e Jogos de Habilidade não serão objeto de estudo deste trabalho.

Um indivíduo, ou grupos de indivíduos, com capacidade de decisão para afetar os demais é chamado de agente. Assim, um indivíduo sozinho pode ser um agente, e ainda, um grupo de indivíduos também pode caracterizar um agente. Seja qual for o caso, esse agente é denominado jogador. As ações de cada jogador, quando afetam os demais jogadores são chamadas de interações.

A representação formal de um jogo permite a análise de situações em que jogadores interagem entre si, agindo racionalmente. Portanto, a Teoria dos Jogos envolve técnicas de descrição e análise, isto é, não somente existem elementos necessários para compor um jogo, mas também existem regras preestabelecidas para apresentar e estudar o mesmo [8], caracterizando o conhecimento do Jogo.

Em Teoria dos Jogos assume-se que os jogadores são racionais, ou seja, os agentes empregam os meios que em sua percepção consideram os mais adequados aos objetivos que almejam, sejam quais forem esses objetivos. O conceito de racionalidade, sob a ótica deste trabalho, exclui qualquer avaliação de natureza moral acerca dos objetivos dos jogadores. Da mesma forma, não faz diferença se os indivíduos possuem motivações de natureza egoísta ou altruísta. Em ambos os casos, a única exigência que se faz dos jogadores é que adotem os meios mais adequados aos seus fins, sejam eles mesquinhos ou generosos.

Entende-se que cada jogador, ao tomar sua própria decisão, leva em consideração o fato de que os jogadores interagem entre si. Portanto, sua decisão terá conseqüências entre os demais jogadores, assim como as decisões de seus concorrentes também

terão conseqüências sobre ele. Obviamente, este comportamento estratégico envolve raciocínios complexos, nos quais aquilo que um dos jogadores decide depende do que ele intuitivamente acredita que os demais farão em resposta às suas ações, e vice-versa.

Os aspectos mais peculiares nos jogos são as idéias de interação e de comportamento estratégico. Um jogo envolve a interdependência das ações de seus jogadores, e isso leva naturalmente aos jogadores a considerarem, nas suas decisões, as causas e os efeitos de suas ações sobre os demais, assim como as reações de seus adversários. Deste modo, os jogadores tomam decisões estratégicas, em um contexto no qual suas decisões não contemplam apenas os seus objetivos e suas possibilidades de escolha, mas também os objetivos e as possibilidades de escolha dos outros jogadores [9].

Contudo, a Teoria dos Jogos não deve ser utilizada indiscriminadamente como instrumento de previsão do comportamento de agentes em situações de interação estratégica. Muitos fatores podem interferir na realidade, em comparação com aquilo que é previsto pela teoria. Nem sempre as pessoas, ou mesmo as organizações, se comportam de forma dita racional, ou seja, de forma a empregar os meios que dispõem do modo adequado aos seus objetivos.

2.2 Racionalidade

A Teoria dos Jogos, conforme apresentado, ajuda a entender o processo interativo de decisão dos agentes. Entretanto, o estudo do processo de tomada de decisão é realizado através de abstrações. Estas abstrações excluem da análise todos os fatores particulares e acidentais que possam afetar o resultado do processo em estudo, o que não significa em absoluto que esses atos não possam ser importantes na determinação do resultado final. Por outro lado, a teoria ajuda a desenvolver a capacidade de raciocinar estrategicamente, explorando as possibilidades de interação racional entre agentes, possibilidades estas que nem sempre corresponde a intuição humana.

Na seção anterior, foi observado que a Teoria dos Jogos estuda a interação estratégica entre agentes que se comportam racionalmente. Entretanto, esta carac-

terística de racionalidade impõe limites à teoria que precisam ser compreendidos com clareza. Foi mencionado que se um indivíduo age racionalmente, ele usará os meios que dispõe da melhor forma possível para atingir seu objetivo. Portanto, um indivíduo que deseje realizar seus objetivos por meio de uma ação racional deve formular uma hipótese inicial sobre a melhor forma de agir para atingir sua meta. Em seguida, uma vez definida a hipótese inicial, ele deve procurar coletar informações para testar a validade desta hipótese. Durante o processo de busca de informações, esta hipótese pode permanecer válida, ser corrigida, ou mesmo ser substituída por outra hipótese mais adequada, criando um sistema retro-alimentado para o jogo. Finalmente, com base na hipótese final resultante da coleta de informações, o jogador escolhe a melhor ação a ser adotada [9]. Ainda que a descrição do processo de escolha racional da melhor ação pareça ser esquemática e simplificada, observa-se que diversos fatores externos podem influenciar na tomada de decisão, criando um sistema multi-criterioso para a tomada de decisão estratégica.

Os agentes podem deixar que a ambição do sucesso, em relação aos seus objetivos, distorça suas hipóteses mesmo depois de obtida a informação necessária para refutá-la. Naturalmente tende-se a ignorar, ou dar pouca importância, às informações que negam a forma individual pela qual achamos que o mundo funciona. A própria fase de coleta de informações pode ser afetada pelo desejo do jogador de ser bem-sucedido, visto que algumas vezes tende-se a buscar apenas as informações que confirmam as expectativas de sucesso.

Mais grave ainda, algumas vezes simplesmente não se age de forma racional [10]. Isso pode acontecer, em primeiro lugar, porque as emoções impedem que se avalie imparcialmente a consequência de um ato em relação ao objetivo. Segundo Freud, esta é uma componente estrutural da psique [11] chamada *id*, movida por uma natureza pulsional e inconsciente.

Algumas vezes, também, age-se sem considerar a existência de alguma alternativa melhor, tipicamente quando se é guiado pela tradição. Neste caso, o comportamento do jogador é regido por uma determinada maneira apenas porque é a forma com que todos sempre agiram ao longo do tempo. Este modo comportamental está associado

à componente *ego* da psique, que armazena as experiências adquiridas ao longo da existência do indivíduo e as usa de modo a minimizar sua susceptibilidade ao fracasso.

Um terceiro tipo de comportamento descrito como não sendo orientado pela racionalidade é aquele motivado pelos valores, quando abre-se mão de escolhas em nome de um imperativo ético, religioso ou político. Quando as ações são motivadas por valores, tem-se conhecimento da existência de alternativas, e também das conseqüências das decisões, porém deliberadamente deixa-se de levar isso em consideração para fazer o que precisa ser feito conforme regras socialmente pré-estabelecidas. Esta situação é um caso evidente de predomínio do *superego*, caracterizado pela consciência moral do indivíduo.

Binmore [12] estabelece algumas condições necessárias (ainda que não suficientes), para que os agentes possam apresentar um comportamento racional em uma situação de interação estratégica. São elas:

1. A representação do processo de interação estratégica, o jogo, é relativamente simples.
2. Os agentes jogam o jogo muitas vezes antes, o que lhes permite conhecer suas regras por meio de tentativas e erros.
3. Os incentivos para se jogar bem (isto é, racionalmente) são adequados.

Sendo o jogo relativamente simples, os agentes não terão muita dificuldade em levantar as informações necessárias para formular e corrigir suas hipóteses, acerca da melhor maneira de jogar. Se os jogadores aprenderam por meio de várias tentativas, não terão dificuldade de compreender quais são as regras do jogo, os tipos de jogadores que podem enfrentar, e as melhores estratégias para cada caso. Muitas vezes não se segue um comportamento racional apenas porque a complexidade da situação torna evidente a impossibilidade de chegar a uma decisão racional. Finalmente, se os incentivos a se jogar racionalmente são adequados, pode-se esperar que os jogadores sejam menos tentados a decidir com base nas suas emoções, no recurso a alguma tradição, ou nos seus valores pessoais. Em geral, estes incentivos tendem a tornar muito custosa uma decisão estratégica equivocada.

2.3 Modelagem de um Jogo

Quando se modela um jogo, tenta-se representar uma situação de interação estratégica de forma abstrata, focando apenas os elementos considerados mais importantes para explicar como os jogadores interagem. Assim, qualquer modelo sempre é uma representação muito simplificada de uma realidade mais complexa. O importante é que o modelo incorpore os elementos realmente significativos, e ainda, que sua estrutura seja coerente com a forma pela qual se processa a interação estratégica.

Sob a ótica da modelagem de um Jogo, uma ação ou movimento de um jogador é uma escolha que ele pode fazer em um dado momento. Desta forma, cada jogador possui um certo número de ações disponíveis. Essas ações formam o conjunto de ações do jogador. Conhecer o conjunto de ações de cada jogador é um passo fundamental para a análise de um processo de interação estratégica. Ao avaliar a melhor ação, cada jogador considera não apenas as ações relevantes de que dispõe, mas também todas as ações relevantes que estejam disponíveis para os demais jogadores.

Todavia, não basta considerar as ações possíveis, é importante também conhecer como essas ações evoluem durante o jogo, isto é, se os jogadores tomam suas decisões ao mesmo tempo, ou sucessivamente. Desta forma, existem dois modelos básicos de jogos para tratar processos de interação estratégica: jogos simultâneos e jogos seqüenciais.

Jogos simultâneos são aqueles em que cada jogador ignora as decisões do demais no momento em que toma sua própria decisão. Nestes jogos, os jogadores não se preocupam com as conseqüências futuras de suas decisões porque o desfecho do jogo é imediato. Em geral, jogos simultâneos são representados através da forma normal, conforme a Figura 2.1. Nesta figura, observa-se uma disputa conhecida como "par-ou-ímpar". O jogador A ganha o jogo se a soma das escolhas de ambos os jogadores resultar em um número par, e conseqüentemente, o jogador B perde. Por outro lado, o jogador B ganha caso o resultado seja um número ímpar, o que implica na derrota do jogador A. Estas possibilidades são representadas através das recompensas $(1, 0)$ e $(0, 1)$, respectivamente. Desta forma, uma recompensa é aquilo que todo jogador

Jogador A	Jogador B	
	Par	Ímpar
Par	1,0	0,1
Ímpar	0,1	1,0

Figura 2.1: Jogo descrito na forma normal.

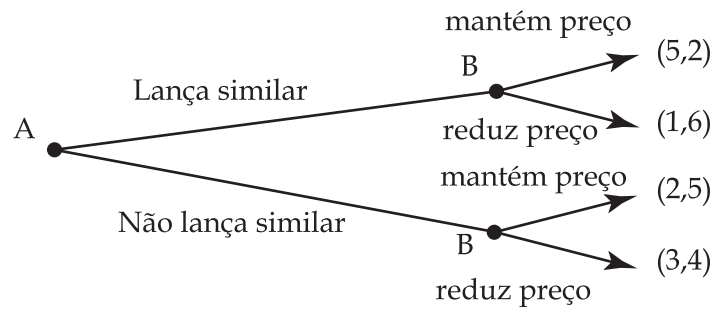


Figura 2.2: Jogo descrito na forma estendida.

obtem depois de terminado o jogo, de acordo com suas próprias escolhas e as dos demais jogadores.

Um jogo sequencial, por sua vez, é aquele em que os jogadores realizam seus movimentos em uma ordem predeterminada. Normalmente, jogos com esta característica são representados através da forma estendida, conforme ilustrado na Figura 2.2. Neste exemplo, uma empresa B possui um produto já consolidado no mercado, enquanto que a empresa A decide se deve, ou não, criar um produto similar ao da empresa B para disputar o mercado. A empresa B , após a decisão de A , pode adotar duas estratégias: ou reduz o preço de seu produto, ou mantém o preço. Uma estratégia é um plano de ações que especifica, para um dado jogador, qual ação a tomar. Na Teoria dos Jogos, a combinação de estratégias é um elemento importante de análise de um jogo.

Enquanto em jogos simultâneos os jogadores decidem sem saber qual foi a decisão dos demais jogadores, no jogo sequencial supõe-se que a empresa B decide o que

fazer em relação ao preço de seu produto sabendo a decisão da empresa A . Assim, ao definir um jogo como simultâneo ou seqüencial, deve-se observar as informações que os jogadores dispõem sobre as decisões dos demais, e não somente a questão temporal de sua execução. Esta diretiva pode implicar em uma situação interessante. Suponha um processo de interação estratégica em que os jogadores realizam suas decisões em momentos diferentes no tempo, porém o jogador que decide em cada etapa não tem como saber o que foi decidido nas etapas anteriores. Assim, a melhor forma de representar esse jogo é como um jogo simultâneo, não obstante o fato de que os jogadores estão tomando suas decisões em momentos diferentes de tempo. Conseqüentemente, a dinâmica em jogos seqüenciais possui um sentido muito mais lógico do que cronológico.

Um fator preponderante, no momento de uma decisão, é saber o grau de conhecimento de um jogador no que se refere às decisões dos demais. Quanto mais informação um jogador possuir, melhor é a base de sustentação de sua tomada de decisão. Esta representação da quantificação do conhecimento de um jogador sobre os demais é chamada de conjunto de informações. Na representação conhecida como extensiva, o conjunto de informações é constituído pelos nós em que o jogador acredita estar dentro das várias possíveis etapas do jogo.

A Figura 2.3a mostra um exemplo em que o jogador B apresenta dois conjuntos de informação unitários, B_1 e B_2 , na segunda rodada do jogo (as flechas pontilhadas significam que o jogo prossegue depois de B jogar). Cada um desses conjuntos possui apenas um nó, o que significa que o jogador B sabe qual foi a escolha do jogador A antes de tomar a sua decisão.

Contudo, poderia acontecer de um jogador B ser obrigado a jogar sem saber a decisão de jogada do oponente A . Na Figura 2.3b, na etapa em que o jogador B é chamado a jogar pela primeira vez, ele não sabe em que nó se encontra, se no nó B_1 , ou no nó B_2 : seu conjunto de informação possui nessa etapa, dois elementos, B_1, B_2 , uma vez que ele acredita que possa estar em qualquer um destes nós. Isto significa que quando o jogador B é chamado a decidir, ele não conhece a história do jogo até ali, ele não sabe qual foi a escolha do jogador A no primeiro movimento. Isso

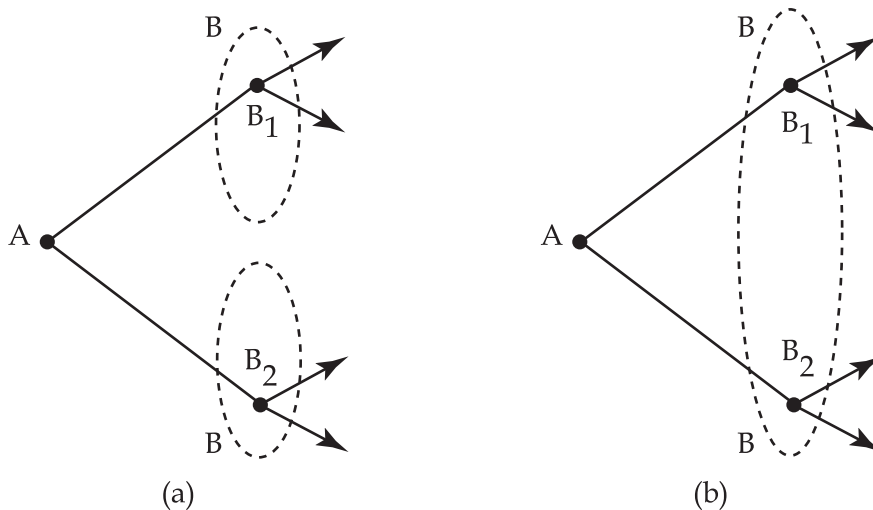


Figura 2.3: Tipos de conjuntos de informação: (a) conjuntos de informação unitários em jogo na forma estendida; (b) conjunto de informação não-unitário em jogo na forma estendida.

nos leva a uma importante classificação dos processos de interação estratégica em relação às informações de que os jogadores dispõem. Um jogo é dito de informação perfeita quando todos os jogadores conhecem toda a história do jogo antes de fazerem suas escolhas [9]. Se ao menos um jogador, em algum momento do jogo, tiver que fazer suas escolhas sem conhecer exatamente a história do jogo, o jogo é dito de informação incompleta (ou imperfeita) [9].

2.4 Jogo de Informação Completa

Para analisar um jogo, a questão da informação é de fundamental importância. Uma hipótese frequentemente utilizada para caracterizar o conhecimento que os jogadores dispõem é a hipótese do conhecimento comum. Em Teoria dos Jogos, quando um fato é de conhecimento comum, todos os jogadores sabem do fato, e todos jogadores sabem que todos sabem do mesmo fato.

Um jogo é dito de informação completa quando as recompensas dos jogadores são de conhecimento comum [9]. Assim, cada jogador sabe com quem está jogando, e sabe que os outros também sabem com quem estão jogando. Pode-se analisar

diretamente o jogo supondo que nada é ignorado pelos jogadores. Esta análise do jogo concentra-se no estudo das recompensas fornecidas aos jogadores de acordo com as estratégias adotadas.

Seja um dado jogador i , cujas estratégias são representadas por s_i . As estratégias dos demais jogadores são representadas por s_{-i} (o índice $-i$ significa tratar-se das estratégias de todos os jogadores que não i). Seja π_i a função recompensa do jogador i . Se uma dada estratégia do jogador i , denominada s'_i , é fortemente dominante para este jogador temos que:

$$\pi_i(s'_i, s_{-i}) > \pi_i(s_i, s_{-i}), \text{ para todo } s_i, \text{ e todo } s_{-i} \quad (2.1)$$

Essa desigualdade representa o fato de que a recompensa proporcionada por s'_i ao jogador i é superior as recompensas proporcionadas por qualquer outra estratégia que i possa adotar, quaisquer que sejam as estratégias adotadas pelos outros jogadores.

Mas além de estratégias fortemente dominantes, também existem casos em que uma estratégia é melhor do que outra apenas em uma situação, sendo no restante das vezes apenas tão boa quanto a outra. Considere novamente um dado jogador i , cujas estratégias são representadas por s_i . As estratégias dos demais jogadores são, tal como anteriormente, representadas por s_{-i} , sendo π_i a função de recompensa do jogador i . Se uma dada estratégia do jogador i , denominada s''_i é fracamente dominante para esse jogador, temos que:

$$\begin{aligned} \pi_i(s''_i, s_{-i}) &\geq \pi_i(s_i, s_{-i}), \text{ para todo } s_i, \text{ e} \\ \pi_i(s''_i, s_{-i}) &> \pi_i(s_i, s_{-i}), \text{ para algum } s_{-i} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Essa desigualdade representa o fato de que a recompensa proporcionada por s''_i ao jogador i é maior ou igual às recompensas proporcionadas por qualquer outra estratégia que i possa adotar, quaisquer que sejam as estratégias adotadas pelos demais jogadores. Entretanto, para pelo menos uma das estratégias que os demais

Empresa B	Empresa A	
	Manter preço	Não manter preço
Lançar	1,-1	1/2, 1/2
Não lançar	-0,1	-0,-1

Figura 2.4: Estudo de caso para empresas com um determinado produto no mercado.

jogadores possam adotar, a estratégia fracamente dominante s_i'' produz recompensas melhores do que qualquer outra.

O método mais simples para se determinar o resultado de um jogo simultâneo é a chamada eliminação iterativa de estratégias estritamente dominadas [9]. Para entender como esse método é aplicado, considere a seguinte situação hipotética: As empresas A e B competem em um mercado, onde a empresa A já tem seu produto lançado no mesmo, enquanto que a empresa B tem que decidir se lança ou não seu próprio produto similar. As recompensas são descritas na Figura 2.4

Enquanto a empresa A não possui estratégia estritamente dominante, a estratégia *Não lançar* é estritamente dominada por *Lançar*, para a empresa B . Com isso, podemos eliminar a estratégia *Não lançar*, conforme feito na Figura 2.4, ao riscarmos a estratégia *Não lançar*. O resultado é praticamente imediato: considerando apenas a estratégia restante *Lançar*, a estratégia *Manter preço* é estritamente dominada por *Reduzir preço* para a empresa A . Segue-se que o resultado final do jogo entre as empresas A e B é dado pela combinação (*Lançar, Reduzir preço*).

Contudo, não obstante a simplicidade desse método de resolução, ele apresenta uma grave limitação: nem todos os jogos apresentam estratégias estritamente dominadas. Considere o exemplo da Figura 2.5. Basta um rápido exame do jogo para ver que o método da eliminação iterativa de estratégias dominantes é inútil: não há nenhuma estratégia estritamente dominada para ser eliminada por nenhum jogador. Desta forma, precisa-se de outro método para determinar o resultado desse jogo. Este método mais genérico é abordado a seguir.

País A	País B	
	Tarifa alta	Tarifa baixa
Tarifa alta	800,800	2.300,-700
Tarifa baixa	-700,2.300	1.700,1.700

Figura 2.5: O jogo do comércio internacional.

2.5 O Equilíbrio de Nash

Diz-se que uma combinação de estratégias constitui um equilíbrio de Nash quando cada estratégia individual é a melhor resposta possível às estratégias dos demais jogadores, e isso é extensivo para todos os jogadores [9]. Uma estratégia s_i^* (equilíbrio de Nash) de um jogador i é considerada a melhor resposta a uma dada estratégia s_{-i} de outro(s) jogador(es), quando não há outra estratégia disponível para o jogador i que produza uma recompensa mais elevada do que s_i^* , quando s_{-i} é jogada. Essa definição exige que todas as estratégias adotadas pelos jogadores sejam as melhores respostas às estratégias dos seus concorrentes. Assim, para que uma dada combinação de estratégias seja considerada um equilíbrio de Nash, é necessário que a equação 2.3 seja verdadeira, para cada estratégia s_i^* .

$$\pi_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq \pi_i(s_i, s_{-i}^*) \text{ para todo } s_i \text{ e todo } i \quad (2.3)$$

Por exemplo, suponha dois países A e B , ambos exportando produtos entre si. Tanto o país A como o país B tem apenas duas opções para tributar suas importações: ou dotam tarifas baixas, ou adotam tarifas altas. A matriz de recompensas da Figura 2.5 ilustra as recompensas de cada país de acordo as tarifas escolhidas, recompensas estas que podem implicar em ganhos ou perdas dos produtores tanto de A como de B . Racionalmente, a estratégia *tarifa alta* é a melhor resposta tanto para o país A como para o país B , qualquer que seja a estratégia adotada pelo outro país. O equilíbrio de Nash nesse jogo é dado, então, pela combinação de estratégias (*tarifa alta, tarifa alta*).

País A	País B	
	Tarifa alta	Tarifa baixa
Tarifa alta	800,800	2.300,-700
Tarifa baixa	-700,2.300	1.700,1.700

Figura 2.6: Definição do equilíbrio de Nash no jogo do comércio internacional.

Pode ser prático adotar alguns artifícios que ajudem a identificar com maior rapidez a existência de algum equilíbrio de Nash na matriz de recompensas. Por exemplo, podemos indicar a preferência dos jogadores entre estratégias usando flechas, onde a direção das flechas verticais indica as estratégias preferidas pelo jogador que está descrito pelas linhas da matriz, e as flechas horizontais indicam a preferência do jogador que está representado nas colunas. Isso porque o jogador sobre as linhas somente pode escolher entre suas opções de estratégia avaliando as consequências de um hipotético movimento vertical. O inverso ocorre com o jogador sobre as colunas (movimento horizontal). Caso as flechas apontem para alguma célula da matriz de recompensas, sem que nenhuma flecha parta desta célula em direção a outra, essa célula é dita um equilíbrio de Nash (veja Figura 2.6).

O resultado obtido na Figura 2.6, nos leva a duas considerações importantes. A primeira delas diz respeito ao fato de que o conceito de equilíbrio de Nash exige que cada jogador individualmente adote a melhor resposta às estratégias dos concorrentes, mas isso não implica que a situação resultante das decisões conjuntas dos jogadores será a melhor possível para todos. A segunda consideração diz respeito à eliminação iterativa de estratégias estritamente dominadas.

Pode-se perguntar o porquê de se empregar o equilíbrio de Nash para determinar o resultado de um jogo proposto, quando o mesmo resultado poderia ser obtido por eliminação iterativa de estratégias dominadas (a estratégia *tarifa baixa* é estritamente dominada para ambos os jogadores). A questão é que o equilíbrio de Nash é um caso mais geral de solução de um jogo, uma vez que nem sempre será possível encontrar estratégias estritamente dominadas. Todavia, o fato de os requisitos do

equilíbrio de Nash serem restritivos, não significa que ele será sempre único. Pode ser que não haja um único equilíbrio de Nash, mas sim vários equilíbrios.

Assim, o equilíbrio de Nash exige que cada jogador adote a melhor resposta às estratégias dos demais jogadores, porém ele não garante que a situação resultante das decisões conjuntas será a melhor possível para todos. Observe na Figura 2.6 que a célula $(1.700, 1.700)$ oferece melhores ganhos do que o equilíbrio de Nash $(800, 800)$. A idéia capturada pela jogada no equilíbrio de Nash é que existe uma tendência à maximização dos ganhos (ou minimização dos prejuízos) de forma segura e continuada. Nota-se que a opção $(1.700, 1.700)$ oferece ganhos significativamente maiores que o equilíbrio de Nash, entretanto, pode-se constatar também que ela é uma opção extremamente insegura, pois o adversário (B) pode ser tentado a obter ganhos de 2.300, induzindo perdas de -700 ao jogador A (célula $(-700, 2.300)$).

2.6 Jogo Seqüencial

O equilíbrio de Nash afirma que as estratégias escolhidas pelos jogadores serão as melhores respostas umas às outras para todos os jogadores, sem considerar a ordem em que eles jogam. No entanto, é preciso reformular o conceito de equilíbrio de Nash, para contemplar a seqüência em que os jogadores realizam suas jogadas.

Para estudar todos os desdobramentos possíveis do jogo, e estabelecer um aprimoramento do equilíbrio de Nash que leve em conta o fato de que os jogadores tomam suas decisões seqüencialmente, necessita-se de um conceito de subjogo. Um subjogo é uma parte de um jogo na forma extensiva, que obedece às seguintes condições:

1. Um subjogo sempre se inicia em um único nó de decisão;
2. Um subjogo contém sempre todos os nós que se seguem ao nó no qual ele se iniciou;
3. Se um subjogo contém qualquer parte de um conjunto de informação, então ele conterá todos os nós do conjunto de informação.

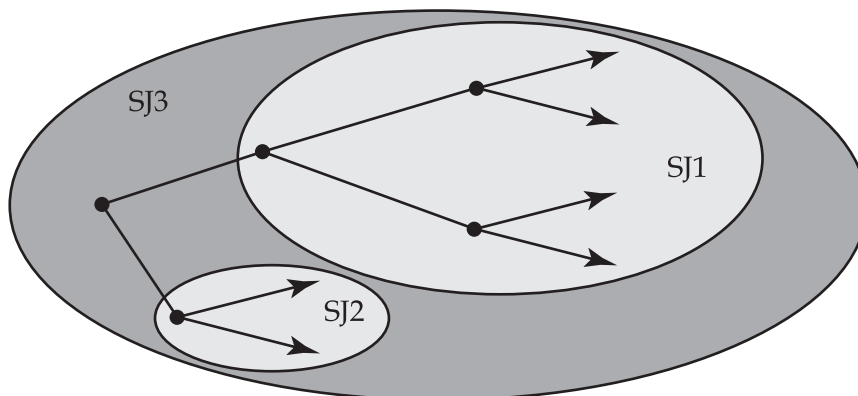


Figura 2.7: Representação de diversos subjogos.

A Figura 2.7 ilustra a partição de um jogo em subjogos. Note que as estratégias, os jogadores e as recompensas foram omitidos nesta representação esquemática. Temos então três subjogos, denominados SJ1, SJ2 e SJ3. Observando-se inicialmente o SJ1, nota-se que todos os nós que pertencem ao conjunto de informação estão envolvidos pelo SJ1 (condição 3). Esse subjogo está começando em um único nó (condição 1) e ele se estende até as recompensas dos jogadores (condição 2). O mesmo vale para SJ2 e SJ3. Uma combinação de estratégias é um equilíbrio de Nash perfeito em subjogos se ela preenche, simultaneamente, as duas condições seguintes: (1) é um equilíbrio de Nash para o jogo na sua totalidade, e; (2) é um equilíbrio de Nash em cada subjogo.

O procedimento para seleção entre vários equilíbrios de Nash em jogos sequenciais é conhecido como indução inversa. Inicialmente, analisa-se o jogo de trás para frente, indo das recompensas dos jogadores até o primeiro nó de decisão que aparece isoladamente, procurando identificar as melhores opções de cada jogador. Uma vez identificado o ramo da árvore de jogos que conduz ao melhor resultado, apaga-se os demais ramos, obtendo um jogo mais simplificado. A operação é repetida até se chegar ao nó inicial do jogo, o nó raiz. A seguir, na Figura 2.8, apresenta-se a aplicação da indução reversa a um jogo qualquer

Desta forma, em um jogo sequencial de informação perfeita, uma combinação de estratégias é um equilíbrio perfeito em subjogos se, e somente se, essa combinação

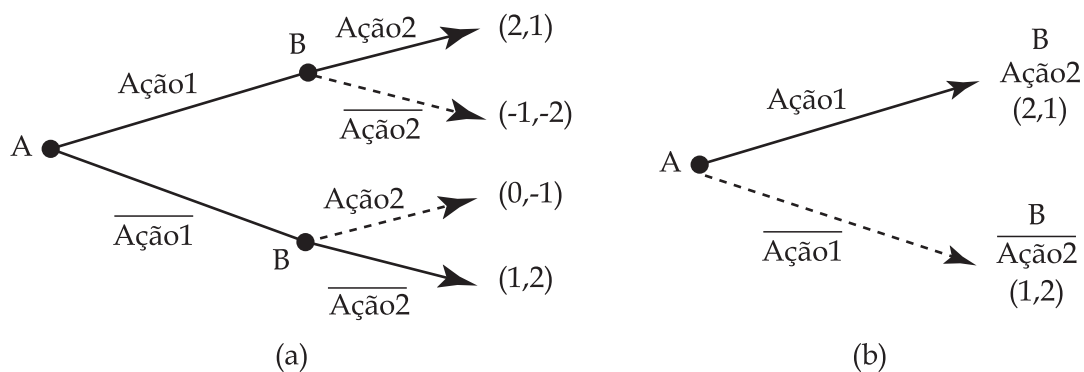


Figura 2.8: Aplicação da indução reversa, onde as setas pontilhadas identificam a ação que foi descartada: (a) primeira etapa da aplicação da indução reversa; (b) segunda etapa da aplicação da indução reversa.

for selecionada como um equilíbrio de Nash por intermédio da indução reversa.

2.7 O Jogo do Ultimato

Os modelos econômicos padrões de tomada de decisão humana, tal como a função de recompensa, tipicamente minimizam ou ignoram a emoção dos agentes durante o processo de tomada de decisão, idealizando o jogador como uma máquina cognitiva perfeitamente racional. De fato, ele o é em muitas situações. Entretanto, esta abordagem tem sido colocada em discussão pelos que se chamam economistas comportamentais, que apontam para a necessidade de se adicionar fatores psicológicos e emocionais à modelagem da tomada de decisão [13, 14]. Mais recentemente, pesquisadores começaram a utilizar os recursos de neuroimagem para avaliar dinamicamente o comportamento dos indivíduos em jogos econômicos [15, 16].

As limitações dos modelos econômicos correntes são ilustradas pelas constatações empíricas de um jogo conhecido como jogo do Ultimato. Neste jogo, é dada a oportunidade de dois jogadores dividirem uma determinada quantidade de dinheiro. Um dos jogadores é encarregado de realizar uma proposta sobre como realizar a distribuição do dinheiro. O segundo jogador pode aceitar, ou rejeitar a proposta. Se a proposta é aceita, o dinheiro é dividido conforme a oferta, mas se a proposta

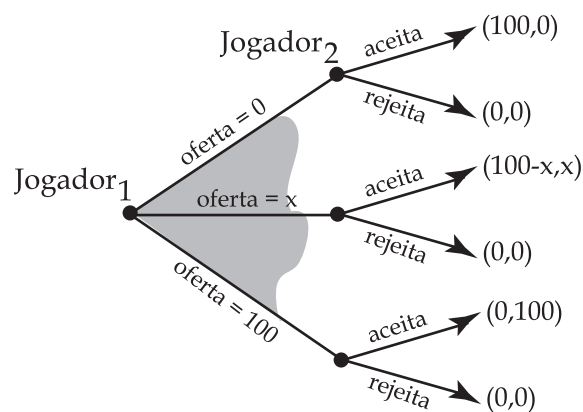


Figura 2.9: Representação do jogo do ultimato na forma extensiva.

é refutada, então nenhum dos jogadores recebe qualquer quantia do dinheiro. Em ambas as situações, o jogo é dado por encerrado.

A negociação em questão é representada por um jogo seqüencial que se desenvolve em duas rodadas. A Figura 2.9 ilustra esta situação para um caso hipotético em que se deseja dividir um valor de \$100. Na primeira rodada, o Jogador 1 escolhe a oferta que será oferecida, enquanto que na segunda, o Jogador 2 decide se aceita a divisão proposta. Ao término do jogo, são atribuídas as recompensas de acordo com as escolhas dos jogadores.

A solução econômica dita racional para o jogo do Ultimato é que o primeiro jogador ofereça a menor quantidade possível de dinheiro, e o segundo jogador, aceitará esta proposta pois qualquer quantidade de dinheiro é melhor que nenhuma. Entretanto, estudos de comportamento de culturas industrializadas indicam que, independente do volume de dinheiro em jogo, a média das ofertas é um valor de cerca de 50% da quantia total. Ofertas baixas (em torno de 20% do total) têm 50% mais chance de serem rejeitadas [17, 18, 19, 20, 21]. Este experimento é particularmente intrigante, pois demonstra que existem situações do jogo nas quais as pessoas efetivamente estão fortemente dispostas a rejeitar o ganho financeiro.

A pergunta chave a ser feita é o porquê das pessoas se comportarem desta forma. O jogo é tão simples que se pode assumir como improvável a possibilidade da re-

rejeição estar relacionada com a incapacidade dos jogadores compreenderem as regras do jogo, ou com a incapacidade de conceber uma jogada [22]. Com base nos questionários fornecidos aos participantes após o jogo, indica-se que a rejeição em muitas vezes foi fruto de alguma reação de raiva associada a uma oferta tida como injusta [23]. As emoções negativas provocadas por tratamento injusto no jogo do Ultimato podem às vezes levar aos jogadores a sacrificar ganhos financeiros, objetivando a punição do adversário diante de sua falta de consideração. Ofertas injustas induzem um conflito ao segundo jogador que deve escolher entre motivos racionais (aceitar) e emocionais (rejeitar), motivos estes que podem ser visualizados na ativação cerebral de regiões corticais responsáveis por tratar esta situação. Este assunto será retomado com mais detalhes no Capítulo 5.

Capítulo 3

Neurociência

O cérebro é o órgão mais complexo do organismo, situando-se na fronteira da Biologia e da Psicologia, isto é, a abordagem anatômica e a abstração da mente. Ao mesmo tempo em que é o centro controlador de todos os outros órgãos do corpo, possui funções mentais superiores que definem as características básicas do ser humano. Por este motivo é natural que surjam muitas dificuldades na definição de suas estruturas e de seus respectivos relacionamentos.

Há um determinismo genético que define a estrutura básica do cérebro desde os primeiros momentos, mas é interessante saber que os genes do ser humano são 98% idênticos aos do chimpanzé [24]. O ser humano se sobressai pelo grande desenvolvimento do córtex que se acredita conter cerca de cinquenta bilhões de neurônios, contra oito e sete bilhões para o do gorila e o do chimpanzé, respectivamente [24].

Na diferenciação dos seres, é comum contabilizar grande influência do meio ambiente em sua evolução. Crianças humanas, por exemplo, educadas até a última infância por animais selvagens, ou em isolamento social, adquirem o comportamento desses animais, não aprendem a falar, e têm as áreas da fala e do desenvolvimento mental imaturas [24, 25].

Assim, o cérebro humano é uma estrutura anatômica que desperta interesse dada sua multiplicidade de comportamentos e configurações. Este capítulo tem por finalidade apresentar esta área de conhecimento conhecida como Neurociência. Nele serão expostos conceitos que irão facilitar o entendimento dos capítulos seguintes

desta Tese.

3.1 O Universo Chamado Neurociência

O sistema nervoso é formado por unidades primárias chamadas de células nervosas (neurônios) e células da glia (neuroglia). A tarefa principal da Neurociência [2] é tentar explicar como o cérebro faz uso destas unidades durante o controle do comportamento humano. Além disto, busca compreender, não somente o modo através do qual estas células são influenciadas pelo ambiente em que o indivíduo está inserido, mas também como o comportamento de outras pessoas afeta diretamente a mecânica de ativação destas mesmas células.

Existem diversas formas de se estudar o sistema nervoso. Pode-se, por exemplo, encará-lo como um objeto desconhecido capaz de produzir comportamento e consciência, tal como a abordagem da Psicologia. Alternativamente, pode-se considerá-lo como um conjunto de células que se conectam através de finos prolongamentos, formando complexos circuitos comunicantes, tal como fazem os neurobiólogos. Uma outra forma de estudo está associada aos sinais elétricos produzidos pelos neurônios, considerando-os como elementos de comunicação, tal como fazem os eletrofisiologistas. O interesse dos neuroquímicos, por sua vez, está focado nas reações químicas que ocorrem entre as moléculas existentes dentro e fora das células nervosas.

Conseqüentemente, são muitos os modos de abordagem do cérebro como objeto de estudo, e ainda, este conjunto de abordagens pode crescer mais, se forem consideradas as análises ditas não científicas, tais como a parapsicologia. Conforme bem observado por Lent [26], o que é chamado simplificada de Neurociência é melhor descrito como Neurociências, diante da diversidade de níveis de conhecimento, onde cada nível está relacionado à abstração da estrutura cerebral, indo da molecular até a anatômica.

A comunidade científica desta área de conhecimento, por muito tempo, discutiu acerca destas variadas formas de estudo do sistema nervoso, quase sempre acreditando na prevalência de uma delas em detrimento das demais. O mais comum era

acreditar que os fenômenos de cada nível de conhecimento poderiam ser melhor explicados por um nível inferior. Assim os fenômenos psicológicos seriam reduzidos a suas manifestações fisiológicas. Os fenômenos fisiológicos reduzidos as suas manifestações celulares. Para os fenômenos celulares, haveria um redução às suas manifestações moleculares. Tudo, então, se resumiria às interações entre as moléculas componentes do sistema nervoso. Atualmente, aceita-se que este mecanismo reducionista não é uma boa sistemática de explicação, embora muitas vezes possa ser uma boa metodologia de estudo. Hoje se entende que os níveis de abordagem do sistema nervoso não são conseqüências uns dos outros, mas sim que eles existem simultaneamente, e funcionando em paralelo.

Um modo esquemático de estudo consiste em considerar cinco grandes disciplinas neurocientíficas, isto é, cinco neurociências [26, 2]: molecular, celular, sistêmica, comportamental e cognitiva. A Neurociência Molecular, também chamada de Neuroquímica ou Neurobiologia Molecular, tem como objeto de estudo as diversas moléculas de importância funcional no sistema nervoso. A Neurociência Celular concentra a pesquisa nas células que formam o sistema nervoso, sua estrutura e sua função. Ela pode ser chamada também de Neurocitologia ou Neurobiologia Celular. A Neurociência Sistêmica agrupa as células em populações nervosas situadas em diversas regiões do corpo humano, que constituem sistemas funcionais tais como o visual, o auditivo, o motor. Quanto à Neurociência Sistêmica, esta apresenta uma abordagem mais morfológica, sendo também chamada de Neurohistologia ou Neuroanatomia, e quando lida com aspectos funcionais, Neurofisiologia. A Neurociência Comportamental dedica-se a estudar as estruturas neurais que produzem comportamentos e outros fenômenos psicológicos tais como sono, comportamento sexual, comportamento emocional, etc. É às vezes conhecida também como Psicofisiologia ou Psicobiologia. Finalmente, a Neurociência Cognitiva trata das capacidades mentais ditas mais complexas, geralmente típicas do homem, como linguagem, a autoconsciência, a memória, etc. Pode ser chamada também de Neuropsicologia.

Os limites entre essas disciplinas não são nítidos, ou pelo menos, ainda não são compreendidos. Sempre que se tenta entender o funcionamento do sistema nervoso, torna-se necessário mesclar conhecimentos inerentes a cada nível de conhecimento.

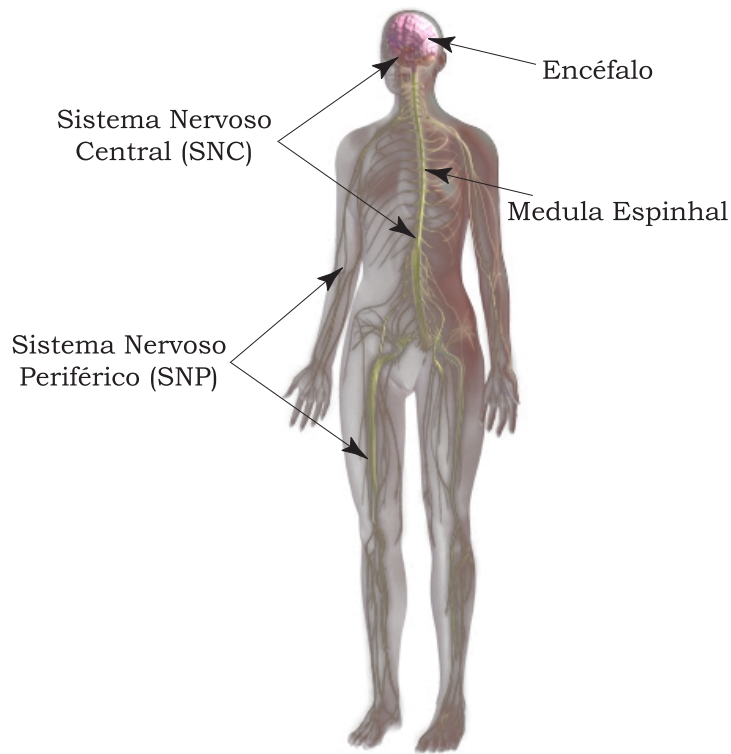


Figura 3.1: O sistema nervoso central e periférico do ser humano.

A dificuldade de se estudar o sistema nervoso reside justamente no fato de que estas fronteiras não são bem conhecidas, e conseqüentemente, o mapeamento entre as áreas de conhecimento torna-se deficitário.

3.2 O Sistema Nervoso

O sistema nervoso do ser humano está distribuído em partes situadas dentro do crânio, na coluna vertebral, e em outras partes distribuídas por todo o organismo. As duas primeiras recebem o nome de Sistema Nervoso Central (SNC), e a última de Sistema Nervoso Periférico (SNP), tal como ilustrado na Figura 3.1. É no Sistema Nervoso Central que está a grande maioria de células nervosas, e alguns prolongamentos chamados fibras nervosas. No Sistema Nervoso Periférico encontram-se relativamente poucas células nervosas, porém possuem um grande número de fibras nervosas agrupadas em filetes alongados conhecidos como nervos.

Os nervos [26, 2], principais componentes do Sistema Nervoso Periférico, podem ser encontrados em quase todas as partes do corpo humano. Seguindo o trajeto de um nervo qualquer, percebe-se que uma de suas extremidades termina em um determinado órgão, enquanto que a extremidade oposta se insere no Sistema Nervoso Central através de orifícios no crânio ou na coluna vertebral. Essa constatação permite supor, como fizeram os primeiros anatomistas, que os nervos são cabos de conexão entre o Sistema Nervoso Central e os órgãos. A mensagem nervosa seria então transmitida por pulsos elétricos conduzidos ao longo dos nervos. Conforme será apresentado no decorrer deste capítulo, esta centralização do processamento no SNC é uma informação que se encontra incompleta, pois parte do processamento de atividade neural pode ser realizado pelo SNP.

Ainda considerando a distribuição anatômica do Sistema Nervoso, em seu trajeto, alguns filetes nervosos se separam do nervo, e outros se juntam a ele. Isso ocorre não porque as fibras nervosas individuais se ramificam ao longo do nervo, mas sim porque grupos independentes delas saem ou entram no tronco principal. Geralmente, perto do Sistema Nervoso Central os nervos são mais espessos, pois contêm maior número de fibras chegando ou saindo. Já próximos aos locais de terminação sobre os órgãos, os nervos ficam mais afinados. Nesses pontos as fibras nervosas individuais se ramificam em abundância, até que cada ramo termina em estruturas microscópicas especializadas.

Entretanto, nem só de nervos é formado o Sistema Nervoso Periférico [26, 2, 27]. Existem células nervosas agrupadas em estruturas chamadas gânglios, situadas nas proximidades do sistema nervoso central. Muitas fibras nervosas que constituem os nervos têm origem em neurônios ganglionares. Outras fibras têm origem em células nervosas situadas dentro do Sistema Nervoso Central.

Esquemáticamente, quando os nervos se unem ao SNC através de orifícios na coluna vertebral, estes são chamados de nervos espinhais. Já os nervos cranianos são aqueles que se conectam ao SNC através de orifícios existentes no crânio. As duas classes podem veicular informações sensitivas, motoras, somáticas ou viscerais. Além disto, muitos nervos são ditos mistos, pois transportam mais de um tipo de

informação funcional.

As fibras dos nervos espinhais [26, 2, 27] podem ter origem em neurônios situados dentro da medula, ou então em gânglios distribuídos fora dela, perto da coluna vertebral. No caso das fibras dos nervos cranianos, a organização é semelhante, só que em neurônios situados em núcleos do encéfalo ou em gânglios situados fora dele, nas proximidades do crânio.

Realizando uma analogia com algumas máquinas, o Sistema Nervoso Periférico pode ser compreendido como sendo um conjunto de sensores, cabos e controladores. Os sensores se distribuem por todos os tecidos do organismo: a pele, os músculos, os ossos e articulações, as víceras e outros tecidos. Sua função é captar as várias formas de energia (informação), produzidas no ambiente ou no próprio organismo, e traduzi-las para a linguagem que o Sistema Nervoso entende, isto é, pulsos elétricos. Os sensores recebem o nome de receptores sensoriais, e ficam ligados às fibras nervosas que constituem os nervos. Estes últimos podem ser entendidos como cabos, cuja função é conduzir os impulsos elétricos gerados pelos receptores até o Sistema Nervoso Central. Estes cabos também conduzem informações no sentido oposto, ou seja, impulsos elétricos produzidos pelo Sistema Nervoso Central são também levados aos músculos esqueléticos e cardíacos, aos músculos das paredes das víceras e às glândulas. Em cada local, estes impulsos são então transformados em ações que liberam energia, seja através da contração muscular, seja através de uma secreção glandular.

Finalmente, não se deve entender que o SNP tem função exclusivamente condutora. Ele possui também pequenos controladores capazes de processar localmente informação, de forma limitada, tal como pequenos computadores. Esses controladores são os contatos entre os neurônios situados nos gânglios espinhais, e os gânglios motores ou secretomotores.

O Sistema Nervoso Central é de fato um termo muito geral, que reúne estruturas neurais situadas dentro do crânio e da coluna vertebral. Nele situa-se a grande maioria dos neurônios dos animais, dentre eles, o ser humano. Pode-se dividir o

SNC, segundo critérios exclusivamente anatômicos, sendo organizado em grandes partes conforme a Tabela 3.1. Conhecer a geografia cerebral torna-se importante para compreender as várias áreas de funcionamento do cérebro.

Sistema Nervoso Central								
Encéfalo							Medula	
Cérebro			Cerebelo		Tronco Encefálico			
Telencéfalo		Diencéfalo	Córtex	Núcleos	Mesencéfalo	Ponte		Bulbo
Córtex Cerebral	Núcleos da Base		Cerebelar	Profundos				

Tabela 3.1: Classificação hierárquica das grandes estruturas do sistema nervoso central

Denomina-se encéfalo [26, 2, 27] o elemento do SNC contido no interior da caixa craniana, sendo o SNC complementado por outro elemento chamado medula espinhal, que se origina a partir do encéfalo através do interior da coluna vertebral. A medula tem uma forma aproximadamente cilíndrica, no centro da qual existe um canal estreito cheio de líquido. Já o encéfalo possui uma forma irregular, contendo dobraduras e saliências, o que permite reconhecer nele diversas subdivisões. A cavidade interna acompanha as irregularidades da forma do encéfalo, formando diferentes câmaras cheias de líquido, chamadas ventrículos. Essa forma irregular do encéfalo se deve ao enorme crescimento que sofre a porção craniana do tubo neural primitivo (o primórdio embrionário do SNC), muito maior que a porção caudal que formará a medula [27].

Pode-se reconhecer três partes do encéfalo [26, 2, 27]: o cérebro, constituído por dois hemisférios justapostos e separados por um sulco profundo; o cerebelo, um cérebro em miniatura, também constituído por dois hemisférios, mas sem um claro sulco de separação; e o tronco encefálico, estrutura em forma de haste que se estende a partir da medula espinhal, escondendo-se por baixo do cerebelo e por dentro do cérebro.

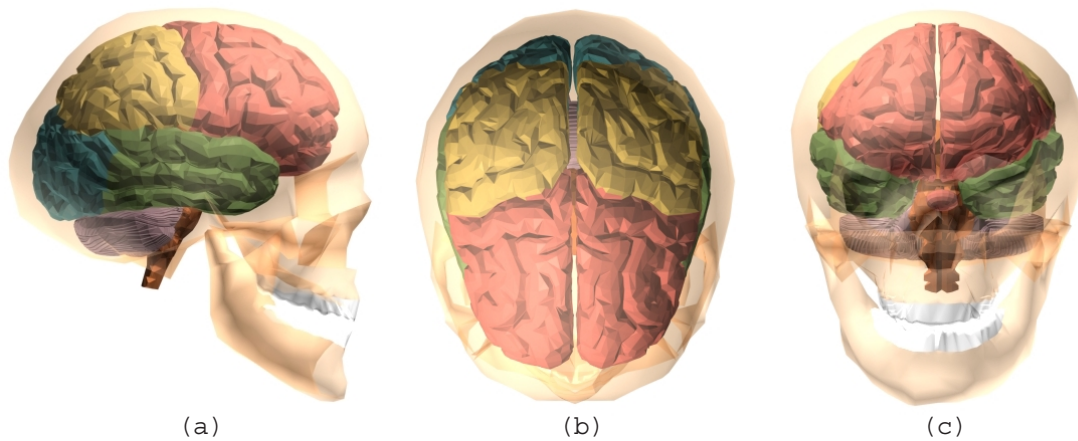


Figura 3.2: Divisões do cérebro chamadas lobos: frontal, parietal, occipital, temporal e insular.

No cérebro [2, 26, 27], o córtex cerebral corresponde à superfície enrugada cheia de giros e sulcos, região em que estão representadas as funções neurais e psíquicas mais complexas. O cérebro pode ser dividido em grandes regiões, cuja delimitação é pouco precisa (ver Figura 3.2). Estas regiões são chamadas lobos: frontal, parietal, occipital, temporal e insular (este último situado profundamente no hemisfério, e, portanto invisível por fora). No interior dos hemisférios estão os núcleos da base, chamados impropriamente de gânglios da base, e o diencefalo, invisíveis ao exame superficial.

No cerebelo [26, 27], a superfície é também enrugada, mas os giros são chamados de folhas, e os sulcos de fissuras. Semelhante ao cérebro, no interior dos hemisférios cerebelares estão os núcleos profundos, também invisíveis ao exame de superfície.

O tronco encefálico se subdivide mesencéfalo e diencefalo. O mesencéfalo representa a parte do tronco encefálico mais externa ao cérebro, que se prolonga até o diencefalo, bem no centro do cérebro. A ponte, por sua vez, é uma estrutura intermediária, enquanto que o bulbo corresponde à parte mais caudal, que se une com a medula espinhal. É do troco encefálico que emerge a maioria dos nervos cranianos mencionados anteriormente.

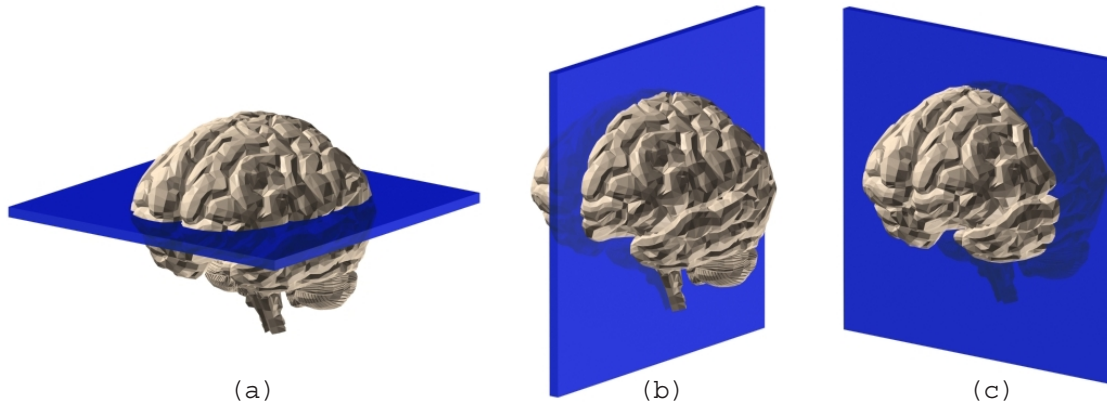


Figura 3.3: Planos do cérebro: (a) Axial; (b) Sagital; (c) Coronal.

Além desta divisão anatômica do cérebro, é possível também o dividir segundo planos de referência [28, 29]. Existem três tipos de planos clássicos utilizados: axial ou transverso, sagital e coronal. Na Figura 3.3a observa-se que o plano transverso é uma divisória horizontal que divide o cérebro em porções superior e inferior. O plano sagital, ilustrado na Figura 3.3b, é um plano vertical que se estende da frente para trás o cérebro, derivando seu nome da direção da sutura sagital do crânio. O plano sagital mediano, médio sagital, divide o cérebro em hemisférios da direita e da esquerda. O plano coronal (ver Figura 3.3c) é a mais fácil de ser interpretado pois corresponde a situação em que olhamos para a direção da face da pessoa, dividindo o cérebro em uma porção anterior (frontal) e uma posterior (dorsal).

3.3 Mapeamento Funcional do Sistema Nervoso

O mapeamento cerebral do sistema nervoso é sem dúvida uma meta ambiciosa, ainda a ser atingida, cuja busca já dura alguns séculos. Atualmente, os avanços neste sentido permitem identificar, com algum grau de precisão, algumas funcionalidades do cérebro, mas certamente este é um campo em que ainda há muito que ser pesquisado. Uma forma interessante de compreender a evolução do mapeamento funcional se dá através de um acidente marcante no século XIX sofrido por um operário. O caso de Phineas Gage [30], conforme ficou conhecido, tornou evidente uma ligação entre uma lesão cerebral específica e uma limitação da racionalidade.

Em 1848, Phineas Gage trabalhava na construção de estradas de ferro nos Estados Unidos. O operário era descrito como equilibrado, meticuloso e persistente quanto aos seus objetivos, além de profissional responsável e habilidoso. Em um acidente nas explosões de rotina para abertura de túneis nas rochas da região onde trabalhava, Phineas Gage foi atingido por uma barra de ferro que transpassou seu cérebro, entrando pela face esquerda, abaixo da órbita, e saindo pelo topo da cabeça (lobo frontal). Surpreendentemente, Phineas Gage permaneceu consciente após o acidente. Ele foi levado ao médico da cidade, Dr. John Harlow, para ser socorrido e sobreviveu às esperadas infecções no seu ferimento. Dois meses após o acidente, Gage estava recuperado, sem déficits motores e com linguagem e memória preservadas. A sua personalidade, no entanto, havia se modificado completamente. Phineas Gage transformou-se em uma pessoa impaciente, com baixo limiar à frustração, desrespeitoso com as outras pessoas, incapaz de adequar-se às normas sociais e de planejar o futuro. Não conseguia mais estabelecer vínculos afetivos e sociais duradouros, nem mesmo fixar-se em empregos.

Enquanto outros casos de lesões neurológicas, ocorridas na mesma época, revelaram que o cérebro era o alicerce da linguagem, da percepção e das funções motoras. A história de Gage sugeriu ser um fato marcante. Em certo sentido, comprovou a existência de sistemas do cérebro humano mais dedicados ao raciocínio do que quaisquer outros e, em particular, às dimensões pessoais e sociais do raciocínio. A observância de convenções sociais e as regras éticas previamente adquiridas poderiam ser perdidas, como resultado de uma lesão cerebral, mesmo quando o intelecto e a linguagem não se mostram estar comprometidos.

Involuntariamente, o exemplo de Gage indicou que algo no cérebro estava envolvido especificamente em propriedades abstratas únicas ao ser humano, e que dentre elas, se encontravam as capacidades de antecipar o futuro, a habilidade de elaborar ações conforme o contexto do ambiente social, o sentido de responsabilidade perante si próprio e perante os outros, a capacidade de orquestrar deliberadamente sua própria sobrevivência sob o comando do livre arbítrio.

Mesmo no reduzido mundo da ciência cerebral existente na época, duas perspectivas começavam a se delinear. Uma defendia que as funções psicológicas, como a linguagem ou memória, nunca poderiam ser imputadas a uma região cerebral particular. A outra perspectiva defendia que, pelo contrário, o cérebro possuía partes especializadas que davam origem a funções mentais distintas. O antagonismo existente entre as duas perspectivas era resultante da imaturidade da pesquisa sobre o cérebro na ocasião. O debate prolongou-se por mais de um século e, em certa forma, subsiste ainda hoje.

Contudo, qualquer que tenha sido o debate na época, este concentrou-se sobretudo na questão da localização das funções relacionadas com a linguagem e o movimento. Neste período, curiosamente, nunca se abordou a conexão entre a conduta social desviante e a lesão do lobo frontal. O caso de Gage foi, de fato, utilizado por aqueles que não acreditavam que as funções mentais pudessem estar associadas a áreas cerebrais específicas.

O fisiologista britânico Davis Ferrier foi um dos poucos que se deu ao trabalho de analisar as descobertas com competência e sabedoria [31] *apud* [30]. O conhecimento de Ferrier sobre outros casos de lesões cerebrais acompanhadas de alterações de comportamento social, assim como suas próprias experiências pioneiras sobre estimulação elétrica e remoção do córtex cerebral de animais, colocaram-no numa posição única para avaliar as descobertas de Harlow. Ele concluiu que a ferida de Gage não tinha afetado nem um "centro" motor, nem um "centro" da linguagem, mas sim danificado a parte do cérebro que ele próprio denominara de córtex pré-frontal. Concluiu ainda que tais danos poderiam estar relacionados com a modificação de personalidade de Gage.

Ainda na época de Phineas Gage, os neurologistas Paul Broca, na França, e Karl Wernicke, na Alemanha, chamaram a atenção do mundo da medicina para outros estudos também sobre doentes com lesões cerebrais. De forma independente, Broca e Wernicke propuseram que a lesão em uma área bem determinada no cérebro constituía a causa das recentes disfunções lingüísticas adquiridas por seus doentes. Com alguma relutância e muitas correções, essas propostas foram sendo gradual-

mente aceitas. No entanto, o trabalho de Harlow sobre Gage [32] *apud* [30], ou os comentários de Davis Ferrier, nunca receberam a mesma atenção, ou despertaram com a mesma intensidade o interesse da comunidade científica.

Entende-se que existiram várias razões para isso. Mesmo que uma dada tendência filosófica permitisse conceber o cérebro como a base da mente, era difícil aceitar a perspectiva de que algo como o senso ético pudesse depender significativamente de uma região específica do cérebro. Além disso, é preciso saber que Harlow era um amador, quando comparado com Broca e Wernicke, não sendo capaz de reunir as provas necessárias para sustentar convincentemente seu ponto de vista. A inexistência de uma identificação do local preciso da lesão cerebral de Gage é o ponto em que tal incapacidade se manifesta de forma mais óbvia.

O único grupo de pessoas que pode ter atentado para as idéias de Harlow e Ferrier eram os frenologistas. A frenologia foi fundada por Franz Joseph Gall no final do século XVIII, e era uma curiosa mistura de psicologia primitiva, neurociência e filosofia prática. Algumas idéias de Gall eram audaciosas para época. Ele afirmou categoricamente que o cérebro era o órgão do espírito. Com não menos certeza, defendeu que o cérebro era constituído por um agregado de órgãos e que cada um deles possuía uma faculdade psicológica específica. Neste sentido, não só se distanciou do pensamento dualista vigente, que separava completamente biologia da mente, como também intuiu corretamente que existiam muitas partes que formavam o cérebro. Além disto, também evidenciou a existência de uma especialização em termos das funções desempenhadas por estas partes.

Sob a perspectiva "moderna", não existem centros individuais para a visão, para a linguagem, ou ainda, para a razão ou para o comportamento social. O que na realidade existem são sistemas formados por vários módulos cerebrais interligados, cuja dimensão pode variar desde um único neurônio até uma região citologicamente uniforme. Estes sistemas dedicam-se, de fato, a operações que constituem a base das funções mentais. É também verdade que os módulos cerebrais individuais, em virtude da posição relativa em que se encontram dentro do sistema, contribuem com diferentes componentes para a operação do sistema, e por isso não são permutáveis.

Esse é um ponto muito importante, o que determina a contribuição de uma determinada função cerebral para a operação do sistema em que está inserida não é apenas a estrutura da unidade em si, mas também sua localização espacial no sistema.

Contudo, não se deve cair na armadilha frenológica. Para que fique esclarecido, a mente resulta não só da operação de cada um dos seus diferentes componentes, mas também da operação concertada dos sistemas múltiplos constituídos por estes diferentes componentes. Se por um lado, deve-se reconhecer o mérito no conceito de especialização cerebral proposto por Gall, deve-se censurar a noção de centro cerebral que inspirou. Deve-se igualmente criticar as propostas de que os diferentes órgãos cerebrais geravam faculdades mentais que eram proporcionais ao tamanho do órgão, ou ainda, a idéia de que todos os órgãos e as faculdades eram inatos.

Não é apenas a separação entre mente e cérebro que é um mito. É muito provável que a separação entre mente e corpo não seja menos fictícia. A mente encontra-se incorporada, na plena acepção da palavra, e não apenas cerebralizada. A distinção entre doenças do cérebro e da mente, entre problemas neurológicos e psicológicos, constitui-se em uma herança cultural infeliz que penetra na sociedade e na medicina. Reflete a ignorância básica da relação entre o cérebro e a mente. As doenças do cérebro são vistas como tragédias que assolam as pessoas as quais não podem ser culpadas pelo seu estado, enquanto as doenças da mente, são vistas como inconveniências sociais nas quais os doentes têm muitas responsabilidades. Os indivíduos são culpados por imperfeições de caráter, por modulação emocional deficiente, e assim por diante. A falta de vontade é, supostamente, tida como o problema principal.

3.4 Localização Espacial no Domínio Cerebral

Ao compararem diferentes regiões do córtex cerebral, os anatomistas observaram variações na espessura, nos constituintes celulares das camadas corticais, assim como na densidade das fibras aferentes e eferentes [1]. No início do século XX, os anatomistas estudaram de modo exaustivo, a especialização histológica das regiões corticais. Um destes estudos foi realizado por Brodmann, que subdividiu a totalidade do sólido cortical, tomando com base as variações histológicas das camadas (Figura 3.4).

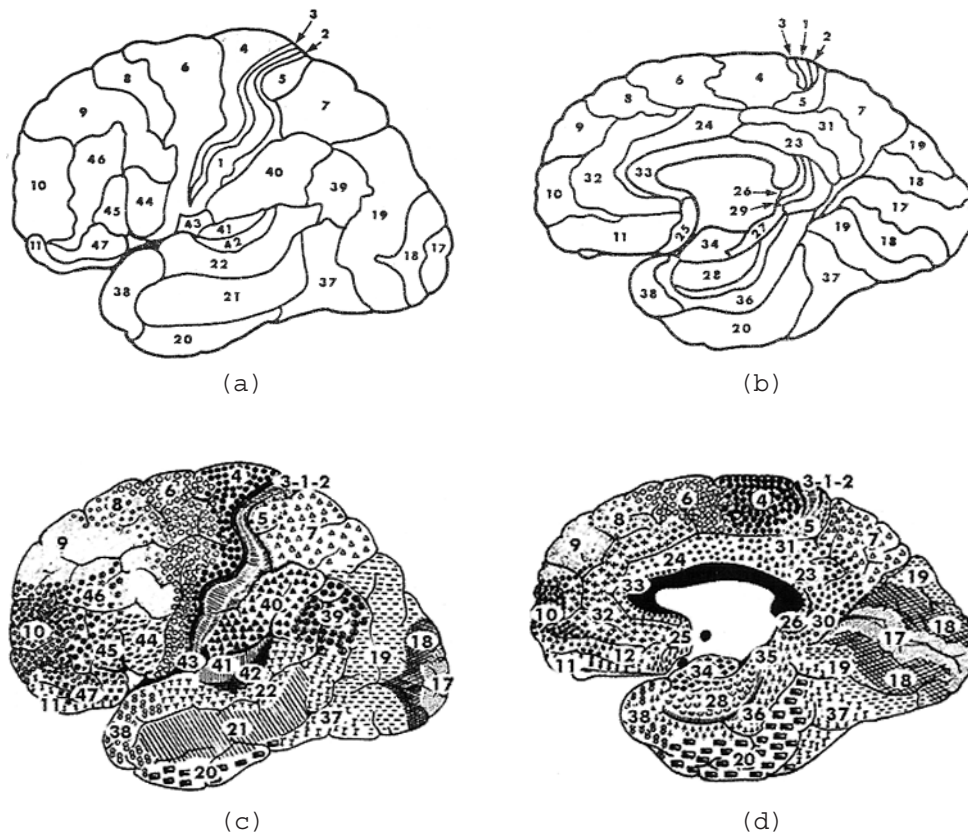


Figura 3.4: Áreas de Brodmann do córtex cerebral do homem: (a) e (c) vista lateral externa do hemisfério esquerdo; (b) e (d) vista lateral interna do hemisfério esquerdo. (imagens *a* e *b* extraídas de Eyzaguirre e Fidone [1], e imagens *c* e *d* extraídas de Kandel et alli [2])

Baseado nas diferenças da citoarquitetura, isto é, na arquitetura característica dos arranjos celulares dos lobos corticais, Brodmann determinou 52 áreas anatômicas.

Atualmente, o sistema de enumeração desta divisão histológica leva o nome de Brodmann, sendo amplamente utilizado como forma de localização espacial da atividade cerebral, e ainda, como guia neurocirúrgico [33]. Além disso, os fisiologistas demonstraram que algumas das áreas de Brodmann coincidem com regiões que possuem funções específicas. Entretanto, outras áreas não possuem uma clara correspondência, ou pelo menos não foi comprovada tal relação [29, 33, 1].

As correspondências comprovadas deste tipo de associação entre região do cérebro e função característica, atingem um ápice na área 17 de Brodmann (*BA17*), que está equiparada à área visual primária. Por outro lado, conforme mencionado anteriormente, em muitos casos não foi possível atribuir funções específicas e individuais às áreas de Brodmann. O que se observa é que as funções cerebrais fazem uso de mais de uma destas áreas, significando que a mesma função pode ser realizada por regiões corticais distintas. Em virtude desta aparente dissociação entre as propriedades citoarquitetônicas e as funcionalidades, as áreas de Brodmann são freqüentemente referenciadas por motivos simplesmente descritivos.

Desta forma, as áreas de Brodmann definem uma forma de localização espacial capaz de determinar a posição de uma região dentro do volume cerebral. Entretanto, existem formas mais precisas de localização, baseadas no registro pontual. O sistema de coordenadas mais difundido e empregado no mapeamento do cérebro humano é o Sistema de Talairach [34] que sugere uma transformação de escala linear por partes, de modo a remover as diferenças de tamanho do cérebro entre diferentes pacientes. Talairach e Tournoux [34] introduziram três importantes inovações: (1) um sistema de coordenadas que identifica a localização pontual de áreas cerebrais relativas à elementos pontuais anatomicamente invariantes; (2) uma seqüência de transformações espaciais objetivando sobrepor cérebros diferentes, e; (3) um atlas para um cérebro padrão, definindo marcações anatômicas e citoarquitetônicas.

O sistema de coordenadas de Talairach representa um sistema cartesiano para o qual um cérebro qualquer poder ser normalizado, a fim de ser comparado com outros. Entende-se por normalização o conjunto de transformações composto por operações de translação, rotação, escala e *warping*, objetivando sobrepor o cérebro original ao formato padronizado. Neste sentido, o cérebro transformado passa a estar imerso em uma caixa envoltória na qual sua geometria passa a ser representada por coordenadas (x, y, z) .

Para construir este sistema de coordenadas, é necessário primeiramente serem localizadas as comissuras cerebrais anterior (*AC*) e posterior (*PC*). As comissuras são feixes fibrosos que conectam os dois hemisférios do cérebro. A comissura anterior

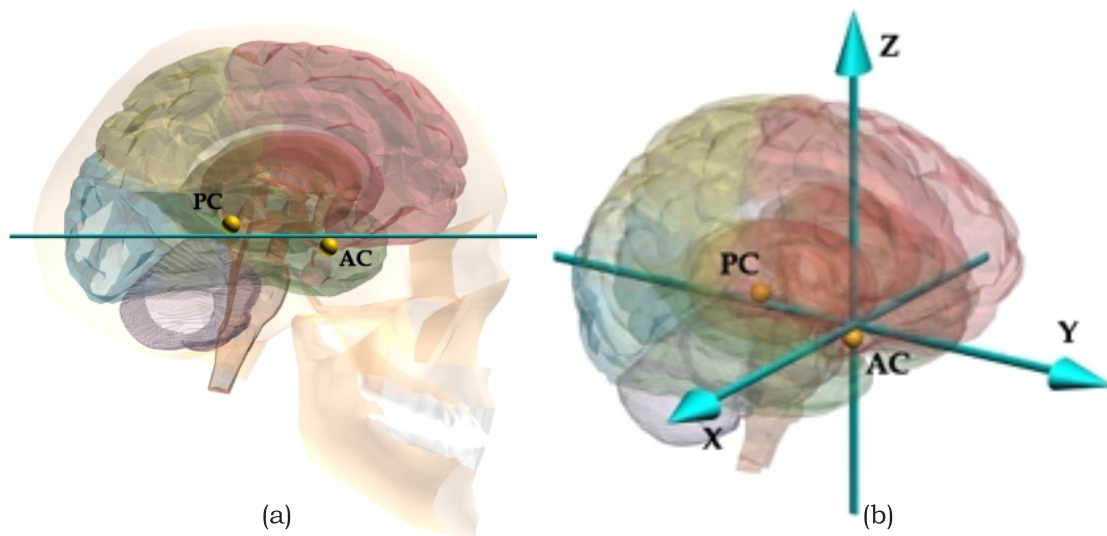


Figura 3.5: Sistema de coordenadas de Talairach: (a) corte sagital evidenciando os pontos AC e PC , bem a linha horizontal de alinhamento $ACPC$; (b) registro do sistema de coordenadas indicando o sentido dos eixos cartesianos.

(AC) conecta os giros temporais médios e inferiores dos dois hemisférios, passando pela frente do fórnice. Já a comissura posterior (PC), que conecta o cérebro mediano às estruturas do diencefalo, está localizada imediatamente a frente e abaixo do colículo superior, inferior à glândula pineal. A Figura 3.5a, ilustra o posicionamento dos pontos AC e PC .

Devido às invariâncias espaciais observadas nas comissuras de diferentes cérebros, Talairach e Tournoux as escolheram como pontos de referência padrão para o processo de alinhamento do cérebro descrito em seu atlas [34]. Para alinhar uma imagem volumétrica ao espaço de Talairach, um cérebro tem que ser ajustado de modo que as comissuras anteriores e posterior estejam em uma linha horizontal, o que é obtido através de operações espaciais de translação e rotação. Esta linha horizontal $ACPC$ passa imediatamente acima do ponto AC e imediatamente abaixo de PC .

Uma vez alinhado, definem-se os planos anterior, posterior, superior, inferior, direito e esquerdo do volume envolvente do cérebro, sobre esta nova orientação. Esta caixa envolvente sofre então operações de escala e *warping*, de tal modo que

seja feita uma sobreposição eficiente com o cérebro padrão proposto por Talairach e Tournoux. As dimensões x, y, z referem-se aos eixos esquerda-direita, posterior-anterior, ventral-dorsal respectivamente, tal como ilustrado na Figura 3.5b.

Quando normalizado, o cérebro torna-se um modelo geometricamente consistente com o modelo anatômico cerebral empregado no atlas de Talairach. Sob esta ótica, pode-se identificar com facilidade uma determinada região de interesse do objeto de estudo através do exame deste mesmo atlas.

O modelo geométrico proposto por Talairach foi construído a partir de estudos feitos sobre um cérebro patológico, sendo este o motivo de algumas críticas da comunidade científica neurológica. Existe também um segundo modelo geométrico cerebral, preconizado pelo Instituto Neurológico de Montreal, que foi baseado no cérebro de uma pessoa dita sadia e definido sobre o mesmo sistema de coordenadas de Talairach.

Infelizmente, observam-se na literatura relatos de variações na anatomia de diversos pacientes, mesmo após o processo de transformação dos dados para o sistema estereotáxico de Talairach. Variações significativas nos padrões corticais, observadas em pacientes normais e, exacerbadas por doenças causadoras de variações morfológicas, sugerem cautela ao selecionar uma transformação de sistemas de coordenadas, com vistas a comparações de características estruturais e funcionais entre diferentes indivíduos. Certamente, o grande desafio surge de situações nas quais observam-se modificações de topologia advindas, por exemplo, de desenvolvimentos ou degenerações cerebrais.

Várias abordagens matemáticas foram desenvolvidas a fim de contemplar este problema peculiar. Algumas abordagens buscam tratar o problema localmente, utilizando deformações elásticas (tais como dilatações, contrações e deformações locais), nas quais destacam-se os trabalhos de Bajcsy e colaboradores [35, 36, 37, 38]. Outras metodologias abordam o problema globalmente, e por isto buscam aproximações mais grosseiras para o cérebro como um todo [39, 40].

3.5 Emoções

Decidir o que constitui uma emoção não é uma tarefa trivial, sendo questionado pela literatura a exequibilidade de tal definição [41, 42]. De forma independente, pode-se perceber a emoção através alterações visíveis de comportamento, ou mesmo, através da indução de determinadas modificações cerebrais.

A sobrevivência de um dado organismo depende de uma série de processos biológicos, que mantém a integridade das células e tecidos em toda sua estrutura. Para tal, o cérebro possui circuitos neurais inatos, cujos padrões de atividade, coadjuvados por processos bioquímicos no corpo propriamente dito, controlam de forma segura reflexos, impulsos e instintos, garantindo assim que a respiração e a alimentação ocorram conforme a necessidade biológica [43].

Por outro lado, afim de evitar condições ambientais adversas, ou a destruição por parte dos predadores, existem circuitos neurais para impulsos e instintos que induzem, por exemplo, ao comportamento de luta ou de fuga. Outros circuitos controlam os impulsos e instintos que asseguram controlar a continuidade dos genes, por meio de comportamento sexual e cuidado com a prole. Podem-se mencionar inúmeros outros circuitos e impulsos específicos, entre os quais aqueles que se reportam à procura de uma quantidade ideal de luminosidade ou escuridão, de calor ou de frio, de acordo com a hora do dia, ou com a temperatura ambiente [24].

Em geral, os impulsos e instintos operam, seja através da geração de um determinado comportamento, ou seja mediante a indução de estados fisiológicos que levam os indivíduos a agir de um determinado modo, conscientemente ou não [30]. Praticamente todos os comportamentos que resultam de impulsos e instintos contribuem para a sobrevivência, quer em termos diretos, pela execução de ações de preservação da vida, quer em termos indiretos, pela criação de condições vantajosas para a sobrevivência, ou pela diminuição da influência de condições potencialmente adversas. As emoções podem ser vistas como uma manifestação dos impulsos e instintos, constituindo-se em uma parte essencial da sobrevivência do indivíduo.

A abstração do impulso atua de forma oculta sobre a ativação de processos físicos e químicos no corpo do indivíduo, que geralmente não são perceptíveis de forma consciente. Um indivíduo, por exemplo, desconhece o estado dos íons de potássio, a quantidades de hormônios em circulação e o número de glóbulos vermelhos em seu corpo, a menos que estas características sejam determinadas por meio de uma análise laboratorial, ou por alterações patológicas.

Contudo, existem mecanismos reguladores pré-organizados, ditos mais complexos, que envolvem comportamentos visíveis, permitindo avaliar indiretamente sua existência quando induzem a uma ação. Estes mecanismos reguladores, chamados instintos, asseguram a sobrevivência do indivíduo ao excitar alguns padrões de alteração no corpo que ativam um impulso. Estas alterações podem ter com significado específico (fome, náusea), uma emoção identificável (medo, raiva), ou ainda uma combinação de ambos.

Um impulso pode ser desencadeado a partir de alterações bioquímicas do corpo humano (um baixo nível de açúcar no sangue), de ações exteriores (uma ameaça de perigo), ou de fenômenos abstratos criados pela mente humana (percepção da eminência de uma catástrofe). Estes padrões de alteração no corpo podem desencadear uma resposta bioreguladora interna, um padrão de comportamento instintivo, um plano de ação autoprotetora, ou ainda, uma composição destas respostas. Os mecanismos pré-organizados não são importantes apenas para efeitos de regulação biológica básica. Eles ajudam também o organismo a classificar fenômenos, como bons e maus, em virtude da avaliação subjetiva de um possível impacto sobre sua sobrevivência.

Os dados sobre a regulação biológica mostram que a seleção de respostas das quais os organismos não têm consciência, e que por conseguinte não são deliberadas, ocorrem constantemente nas estruturas cerebrais de evolução mais antiga. Os organismos cujos cérebros incluem apenas aquelas estruturas arcaicas, e são destituídos de estruturas evolutivamente modernas, executam sem dificuldade a seleção de respostas. Pode-se entender essa seleção como uma forma elementar de tomada de decisão, desde que fique bem claro que não se trata de uma atitude consciente, mas

sim um conjunto de circuitos neurais naturalmente ativados. No entanto, observa-se que os organismos sociais que se vêem confrontados com situações complexas são levados a decidir em um ambiente de incerteza. Nestas situações, observa-se o emprego do sistema do neocórtex, que é o setor mais moderno do cérebro, em termos evolutivos. Assim, tem-se que o âmago cerebral antigo encarregar-se-ia da regulação biológica básica, enquanto que o neocórtex deliberaria sobre ativações mais abstratas e complexas.

Atualmente, defende-se que o comportamento humano se encontra além dos impulsos e dos instintos, e utiliza tanto o neocórtex como o subcórtex, isto é, ambos são recrutados para funcionar conjuntamente. A racionalidade passa ser uma consequência de uma ativação combinada. Para a Ciência, ainda não está claro a forma através da qual os processos racionais e não racionais estão alinhados, respectivamente com as estruturas corticais e subcorticais no cérebro humano. As emoções e os sentimentos, os quais constitui-se em aspectos centrais da regulação biológica, sugerem que elas estabelecem a ponte entre os processos racionais e não racionais, entre as estruturas corticais e subcorticais.

Outra questão de estudo está relacionada com a existência de reações emocionais instaladas no momento do nascimento. Como exemplo, pode-se citar que os animais, e os seres humanos, se encontram inatamente instalados para ter medo de criaturas hostis tais como ursos e águias. Uma hipótese é a de que o indivíduo está programado para reagir com uma emoção de modo pré-organizado, quando certos estímulos no mundo ou em seus corpos são detectados individualmente, ou em conjunto. Neste sentido, a reação emocional pode atingir alguns objetivos úteis, como por exemplo, esconder-se rapidamente de um predador, ou demonstrar raiva em relação a um competidor.

No entanto, o processo emocional não termina com as alterações corporais. O ciclo continua, pelo menos no seres humanos, e o passo seguinte é a sensação da emoção em relação ao objeto que a desencadeou, a percepção da relação entre o objeto e o estado emocional. O motivo pelo qual há necessidade de se conhecer tal relação é que a consciência proporciona uma estratégia de proteção ampliada.

As emoções primárias [44], ou universais, são aquelas inatas e pré-organizadas. Elas dependem de uma rede de circuitos do sistema límbico, sendo a amígdala e o cíngulo os elementos anatômicos principais.

Contudo, o mecanismo de emoções primárias constitui o processo básico, não descrevendo toda a gama de comportamentos emocionais. Além destas, existem as emoções secundárias [44], ou sociais, capazes de ativar comportamentos emocionais mais complexos. Estas são desenvolvidas a partir do nascimento do ser humano, sendo moldadas de acordo com suas experiências ao longo de sua existência. A Tabela 3.2 ilustra um conjunto de emoções primárias e secundárias [42].

Emoções Primárias	Emoções Secundárias
alegria, tristeza, medo, raiva, surpresa, repugnância	pena, culpa, gratidão, indignação, vergonha, admiração, desprezo, orgulho, ciúme, preocupação, afeto, altruísmo

Tabela 3.2: Enumeração de emoções primárias e secundárias.

O processamento emocional que se encontra prejudicado por lesões cerebrais é do tipo secundário, tal como o caso de Gage (lesões pré-frontais) descrito na seção 3.3. Esses doentes não conseguem gerar emoções relativas às imagens evocadas por determinadas categorias de situações e estímulos, não podendo por isso, ter subsequente sentimento. No entanto, esses mesmos doentes pré-frontais podem sentir emoções primárias e, por esse motivo, o lado afetivo pode, à primeira vista, parecer inato (revelariam medo se alguém lhes gritasse inesperadamente, ou se suas casas tremessem durante um terremoto). Por outro lado, os doentes com lesões no sistema límbico, na amígdala, ou no cíngulo anterior, registram habitualmente uma diminuição tanto das emoções primárias como secundárias, apresentando manifestações mais limitadas de afetividade.

As lesões do sistema límbico limitam o processamento das emoções primárias, as lesões nos córtices pré-frontais limitam o processamento das emoções secundárias. Sperry *et alii* [45, 46], estabeleceram uma intrigante correlação neural para as emoções

humanas: as estruturas no hemisfério cerebral direito registram um envolvimento preferencial no processamento básico da emoção. Outros trabalhos [47, 48, 49, 50, 51] sustentam a idéia da assimetria no processo emotivo, mas também indicam que ela não se reporta de igual modo para todas as emoções.

De uma forma geral, pode-se afirmar que as emoções, tidas como funções mentais superiores, estão diretamente relacionadas com a da mente. Conforme já apresentado, a forma pela qual esta é estudada varia de acordo com o tipo de abordagem adotada. Uma referência menos determinística que aquela empregada pela Neurociência define as diretrizes seguidas pela Psicanálise diante da tentativa de compreensão da mente humana, sendo esta apresentada na seção a seguir.

3.6 A Psicanálise e as Neurociências

Transmitir aquilo que a Psicanálise diz respeito não é uma tarefa nada fácil, sobretudo porque a objetividade tão clara ao discurso científico é impotente para abordar a complexidade do psiquismo humano. Não é à toa que Freud, o inventor da Psicanálise, valeu-se inúmeras vezes da arte, da literatura, da mitologia, da filosofia, entre muitos outros recursos, para explicitar seus pressupostos. É como se encontrasse neles vias para mostrar a dimensão do indizível, do que escapa à possibilidade de ser abordado pelo universo da lógica da consciência [52].

Atualmente observa-se uma grande incredulidade recíproca entre a Psicanálise e as Neurociências, seja tanto quanto ao aspecto técnico, quanto ao filosófico. Trata-se de uma discussão acirrada [53], e que em muitos casos torna-se bastante agressiva sob o ponto de vista científico.

A Psicanálise atesta que o destino do ser humano não se restringe a seu ser biológico. Sob esta ótica, ela busca refutar teorias que reduzem o pensamento a um neurônio, ou confundem o desejo com uma secreção química. Uma forma inteligente de argumentação da Psicanálise [54] é supor, inicialmente, que não existiriam motivos para preocupação com os distúrbios psíquicos, visto que todos estariam ligados a uma anomalia do funcionamento das células nervosas, que poderiam ser inibidas

através de medicamentos, tal como preconizam as Neurociências. Entretanto, a Psicanálise complementa este raciocínio indicando que o argumento não é verdadeiro. Não há indícios de que isto seja possível para todos os casos, o que acaba por refutar a hipótese do ser unicamente biológico proposto pelas Neurociências. Na Matemática, isto é universalmente conhecido, e aceito, como uma demonstração por contradição.

O ápice deste litígio acontece em 1980 quando Canguilhem [55] atacou com ferocidade o ideal cognitivo baseado na correlação entre os estados mentais e os estados cerebrais, fazendo claras referências aos trabalhos de Alan Turing, Norbert Wiener e Noam Chomsky. Ele combateu não as ciências e seus avanços, não os trabalhos modernos sobre os neurônios, os genes ou a atividade cerebral, mas uma abordagem eclética na qual se misturavam o comportamentalismo, o experimentalismo, a ciência da cognição, a inteligência artificial, etc. No seu entendimento, o que as Neurociências pretendiam não passava de um instrumento de poder, uma biotecnologia do comportamento humano, que despojava o ser humano de sua subjetividade, e procurava roubar-lhe a liberdade de pensar. Neste sentido, a proposta de Canguilhem é refutar a visão de computabilidade do funcionamento do sistema nervoso.

É certo que existe um radicalismo de ambos os lados, e este é exposto por psicanalistas e neurocientistas mais equilibrados. Por exemplo, Gerald Edelman, um neurobiologista norte-americano e Prêmio Nobel de Medicina, afirma que o inconsciente, no sentido freudiano, continua a ser uma noção indispensável para a compreensão científica da vida mental do homem [54, 56].

Embora a ciência se defina, desde Galileu [57], como o conhecimento das leis que regem os processos naturais, posteriormente ela deu origem a múltiplas abordagens, que têm como ponto comum retirar a análise da realidade humana da antiga dominação das ciências ditas divinas, baseadas na revelação. Daí a existência, a partir do fim do século XVIII, de uma pluralidade de campos, que fazem intervir diferentes tipos de conhecimento, podendo ser agrupado em três ramos: as Ciências Formais (Lógica, Matemática e Linguística), as Ciências Naturais (Física e Biologia) e as Ciências Humanas (Sociologia, Antropologia, História, Psicologia e Psicanálise). As

Ciências Humanas se destacam por compreender os comportamentos individuais e coletivos a partir de três categorias fundamentais: a subjetividade, o simbólico e a significação.

No debate entre o cérebro (elemento biológico) e o pensamento (elemento abstrato), as Ciências Humanas oscilam entre duas atitudes. Uma tende a eliminar toda forma de subjetividade, de significação ou de simbolismo, e a tomar como único modelo da realidade humana os processos físico-químicos, biológicos ou cognitivos. A outra, ao contrário, reivindica estas três categorias, pensando-as como estruturas puramente abstratas. Sob esta ótica, uma abordagem refere-se ao homem como máquina, e outra, a um estudo da complexidade humana que leva em consideração o comportamento subjetivo, os processos simbólicos e a interpretação do inconsciente biológico.

Contradizendo Damásio [30], o ser humano subverte as determinações dos instintos. Ele não come meramente por fome, suas atividades sexuais não se limitam às funções biológicas, e seu sono tampouco. Ele é afetado por inúmeras variáveis. Seu universo de necessidades é intermediado pelo das representações. As coisas não são o que são, mas o que representam para o ser humano. Desta forma, ele pode perder o apetite, ou comer demais, conforme a variação de seus sentimentos de alegria ou tristeza; pode optar pela abstinência sexual por uma razão ideológica ou moral; pode perder o sono diante de uma preocupação. O que o rege não é propriamente um instinto, mas algo de outra natureza, que Freud propõe chamar de pulsão [52].

Neste sentido, é importante ressaltar que não se está afirmando que o inconsciente é o domínio do caótico e do ilógico. A questão da Psicanálise serve para ressaltar o funcionamento de uma outra lógica também operante no psiquismo, que pode se tratar da lógica do paradoxo [57]. Assim, a mente humana pode ser estudada como máquina, e ainda, uma entidade de comportamento emergente.

A lógica do paradoxo pode parecer uma estranha abordagem ao se estudar um determinado fenômeno, mas entende-se que isto depende do grau de maturidade deste mesmo estudo. Atualmente, por exemplo, a dualidade ondulatória e corpuscular

da natureza existencial da luz é perfeitamente aceita pela comunidade científica. Entretanto, isto não foi sempre assim, tal como foi escrito em uma carta de Max Planck [58]:

Você expressou recentemente [...] o desejo de que eu descrevesse os aspectos psicológicos que me levaram propor a hipótese de dualidade da luz [...] Resumidamente, posso descrever minha atitude como um ato de desespero [...] mas desde 1894, passei anos lutando com o problema de equilíbrio entre matéria e radiação, sem nenhum sucesso; eu sabia que esse problema era de importância fundamental para a física [...] portanto, uma explicação teórica tinha de ser encontrada a todo custo.

Aparentemente, o atrito entre a Psicanálise e as Neurociências, sobre a abordagem da mente humana, guarda uma profunda similaridade entre o conflito vivenciado por Planck. Entende-se que há uma imaturidade dos conhecimentos científicos de ambas as áreas, o qual impede uma unificação das teorias. Neste sentido, sugere-se que as ditas Ciências da Mente estão se deparando com uma situação análoga àquela enfrentada pela Física no início do século XX. Qualquer posicionamento científico unilateral parece estar equivocado.

Capítulo 4

Ressonância Magnética

Este capítulo tem por objetivo contextualizar o uso de imagens médicas no estudo da atividade neural, e em particular, aquelas oriundas de exames de Ressonância Magnética Funcional. Inicialmente, são introduzidos os tipos de imagens médicas disponíveis atualmente. Em seguida, é apresentado o aparato físico típico de um sistema de ressonância magnética, bem como o método de construção das imagens, e os artifícios químicos utilizados para aumentar a qualidade das mesmas. Por fim, é realizada uma explanação sobre o uso da ressonância magnética na medição da atividade neural.

4.1 Imagens Médicas

O objetivo do imageamento médico é a avaliação clínica de tecidos e funções orgânicas do corpo humano, por meio de imagens. Embora grande parte de todas as imagens médicas ainda serem provenientes de placas de raio-X (radiografia convencional), o advento da Tomografia Computadorizada, da Ultra-Sonografia e da Ressonância Magnética, tem contribuído significativamente para o desenvolvimento do uso de computadores na Medicina. Diagnósticos por imagem geralmente são técnicas não-invasivas. Entretanto, existem certos procedimentos que combinam técnicas de imageamento com procedimentos invasivos, principalmente durante cirurgias.

Na radiografia convencional [2, 59], a imagem resultante é obtida através da diferença entre a energia absorvida pelos elétrons do objeto a ser visualizado, e

a energia não absorvida. Esta atenuação de energia se dá principalmente através de um fenômeno físico conhecido como efeito Compton [60, 61]. A relação entre a energia emitida e os elétrons da região examinada, irá variar de acordo com a capacidade de transformação energética das várias parte de um mesmo objeto. No caso em que os objetos estudados são órgãos, e regiões do corpo humano, esta capacidade de absorção é medida através do coeficiente de atenuação dos tecidos.

O coeficiente de atenuação de um tecido é diretamente proporcional à densidade do mesmo [62]. Em geral, de modo a produzir a imagem da região analisada, atribuem-se tons de cor branca a tecidos mais densos (maior dispersão de energia), e tons de cor preta aos tecidos menos densos (menor dispersão de energia). Deste modo, a imagem gerada é uma imagem codificada em níveis de tons de cinza.

A Tomografia Computadorizada é um tipo de exame similar a radiografia, que associada a um computador, analisa regiões do corpo humano gerando imagens de precisão superior a radiografia convencional. Ela é um exame não-invasivo que faz uso de raios-X [2, 59].

Na imagem de Ultra-Sonografia [59], o feixe incidente de energia é o ultra-som. Contudo, diferente da radiografia e da tomografia computadorizada, o fenômeno físico medido não é a dispersão de energia, mas sim a reflexão das ondas de ultra-som. Os diferentes tecidos refletem as ondas de ultra-som, produzindo ecos com maior ou menor intensidade. Quanto mais ecogênico o tecido, mais branco este será representado na imagem. Quanto menos ultra-som é refletido, menos ecogênico será o tecido, sendo representado por uma atenuação mais cinza, até que, quando não há reflexão do som a estrutura é descrita como preta.

Ao contrário das imagens de radiografia, que são produzidas por atenuação dos fótons de energia, o sinal de Ressonância Magnética (RM) se origina no centro dos átomos, conhecido como núcleo. Por este motivo, a RM também é conhecida como Ressonância Magnética Nuclear (RMN) [2, 59]. O que dificulta a compreensão das imagens de RM é que as regras para explicar a escala de tons de cinza não são tão simples. Uma região pode ser representada pela cor branca em algumas

imagens, e pela cor preta em outras. O aspecto final das imagens depende não só das propriedades inerentes aos tecidos, mas também da potência do campo magnético utilizado, da temporização da aquisição do sinal e da seqüência dos pulsos de rádio frequência utilizada para estimular os núcleos do paciente.

A Ressonância Magnética é um exame muito útil no diagnóstico de doenças do sistema nervoso. Ela atinge alta resolução, sendo em inúmeras situações, superior à Tomografia Computadorizada [59]. Além disto, devido ao fato de não fazer uso de raios-X, tem-se que o exame é menos agressivo ao organismo humano. Seu uso tem sido fomentado especialmente pela necessidade de utilizar métodos menos invasivos, limitar o dano em intervenções cirúrgicas e monitorar a evolução de lesões. Por outro lado, a Ressonância Magnética sofre a interferência de substâncias metálicas, tais como próteses implantadas no corpo, que nestes casos prejudicam a qualidade da imagem gerada. Atualmente, é um exame fundamental para o estudo de todo o Sistema Nervoso.

4.2 Aparato Físico de Sistemas de RM

A RM é uma ferramenta cara, porém desejável pois não utiliza radiação ionizante, uma característica importante para pacientes que necessitam de vários exames ao longo de um tratamento. Sua capacidade multiplanar permite observar as anomalias de ângulos favoráveis o que possibilita um melhor diagnóstico.

Assim, os equipamentos de RM são sistemas complexos e interligados, que combinam infra-estrutura de *hardware* e *software*. Em geral, os principais componentes de qualquer sistema de RM são [63, 64]:

- O magneto principal;
- As bobinas de homogeneidade;
- As bobinas de gradiente;
- As bobinas receptoras e transmissoras de rádio frequência (RF);
- O sistema microcontrolado.

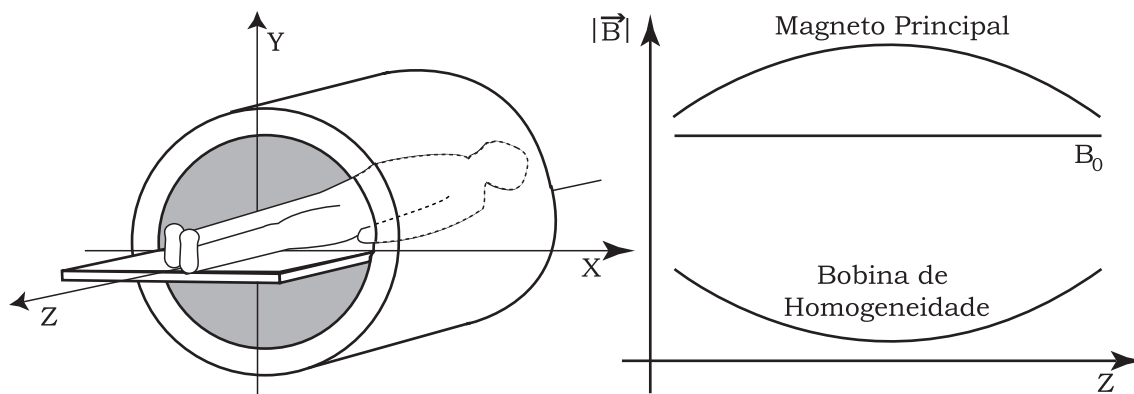


Figura 4.1: A soma dos campos gera um campo uniforme ao longo do eixo longitudinal de um aparelho de RM.

O magneto principal é utilizado para produzir um campo magnético forte e uniforme. Os magnetos principais de uso clínico induzem um campo magnético em torno de $1,5T$ [63], valor este com ordem de grandeza três mil vezes maior que o campo magnético da Terra. Atualmente, os magnetos usados são do tipo supercondutor.

Os magnetos supercondutores atingem campos elevados [64], apresentando uma relação sinal ruído favorável. Suas desvantagens estão relacionadas com o alto custo dos criogênicos utilizados para manter o supercondutor na temperatura de operação, e também com a necessidade de isolamento magnético em virtude de ondas eletromagnéticas externas.

As bobinas de homogeneidade [65] são empregadas para realizar a sintonia fina do magneto principal, isto é, tornar uniforme o campo no interior do magneto. A Figura 4.1 ilustra esquematicamente a compensação realizada pela bobina de homogeneidade para tornar o campo magnético constante ao longo do eixo longitudinal de um aparelho de RM.

As bobinas de gradiente [65] são responsáveis por variar o campo magnético ao longo das três direções ortogonais do aparelho. Esta variação tem por objetivo permitir a localização do objeto. Suponha, por exemplo, um objeto sujeito a um

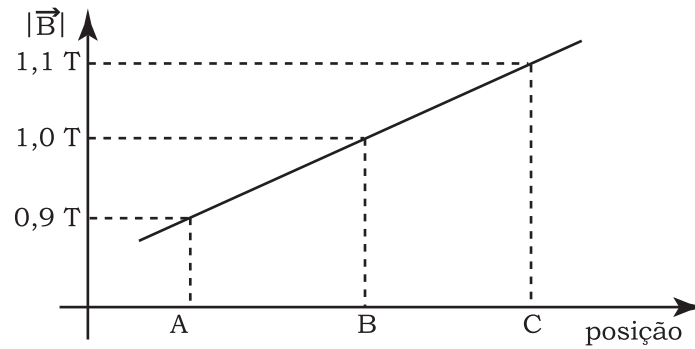


Figura 4.2: O campo uniformemente variado permite localizar espacialmente o objeto.

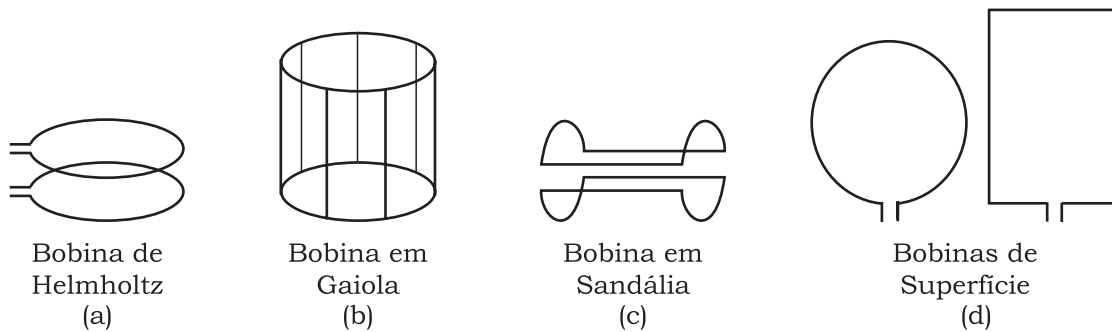


Figura 4.3: Configurações de bobinas receptoras de RF: (a) Bobinas de Helmholtz utilizadas em exames de cervicais; (b) Bobinas em formato de gaiola para exames de cabeça e extremidades do corpo; (c) Bobinas em sandália utilizadas em exames de tornozelos; (d) Bobinas de superfície utilizadas para exames de objetos pequenos.

campo monotônico crescente. Se a magnetização medida deste objeto for de 1T, tem-se que o objeto estaria situado na posição *B*, conforme ilustrado na Figura 4.2.

As bobinas de transmissoras de rádio frequência [65] são responsáveis por excitar os núcleos, de uma determinada região do objeto de interesse, com pulsos de RF aplicados em intervalos de tempo pré-determinados. As bobinas receptoras de RF, por sua vez, funcionam com antenas receptoras de RF, e sua disposição, pode variar de acordo com o objeto que está sendo analisado. A Figura 4.3 apresenta diferentes tipos de bobinas receptoras de RF.

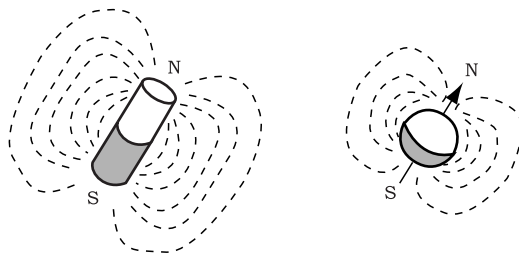


Figura 4.4: Um ímã com pólos norte e sul e um próton em movimento que se comporta como um ímã, produzindo seu próprio campo magnético em miniatura.

Por fim, o sistema microcontrolado é responsável por realizar o controle dos equipamentos, capturar os sinais de ressonância, e construir as imagens. Em geral, são sistemas proprietários que permitem exportar as imagens nos formatos comerciais.

O sinal de ressonância magnética se origina nos núcleos dos átomos de uma determinada região do objeto de estudo, sob a ação de um campo magnético. Pelo fato de ser um fenômeno nuclear, uma descrição precisa e completa necessita do uso de conhecimentos em Mecânica Quântica [61, 66]. De acordo com a Física, cada núcleo possui uma grandeza chamada de spin, que mede o momento de dipolo magnético intrínseco dos prótons e elétrons, isto é, faz uma quantização da propriedade da rotação da carga elétrica [67]. O dipolo magnético é um par de cargas elétricas com sinais opostos que, quando em movimento, induzem um campo magnético. A Figura 4.4 ilustra o campo magnético produzido por um dipolo magnético e por um próton.

O spin é quantificado em unidades de valores fracionários, que são chamadas de números quânticos do spin, onde cada núcleo apresenta seu número de spin característico. Existem somente alguns valores precisos para os spins, que são $0, 1/2, 1, 3/2$, e assim por diante. Quando no núcleo há mais de um próton e/ou nêutron, os spins tendem a formar pares, anulando assim o campo magnético de cada um deles. Deste modo, não há momento magnético resultante nos núcleos de átomos onde existe um número de par de prótons e nêutrons. Núcleos com um número ímpar apresentam um momento magnético resultante.

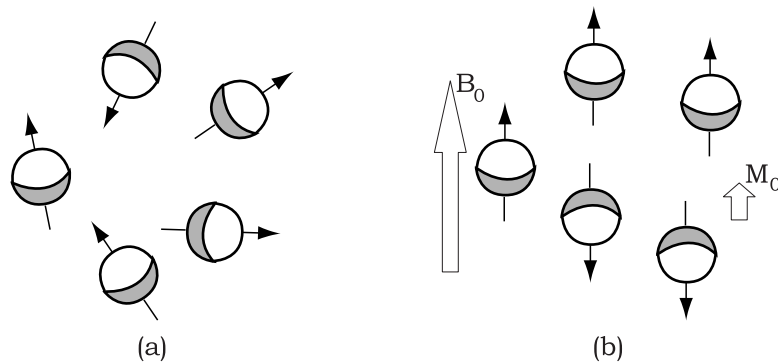


Figura 4.5: Orientação dos spins na ausência e na presença de campo magnético externo.

O núcleo de hidrogênio, por exemplo, além de ser o mais abundante nos tecidos biológicos, possui um único próton, o que resulta no momento magnético mais poderoso do que em qualquer outro elemento existente na natureza. Em consequência de sua maior concentração nos tecidos, e de seu maior momento magnético, tem-se que a intensidade do sinal obtido de um átomo de hidrogênio é mais de 1000 vezes superior do que de em qualquer outro elemento. Por esta razão, o hidrogênio é utilizado como fonte de sinal na maioria dos exames de RM.

Na ausência de campo magnético externo, os spins ficam orientados ao acaso no corpo humano e não existe magnetização resultante em um tecido, tal como a Figura 4.5a. Uma vez aplicado um campo magnético externo (B_0), os spins se alinham na mesma direção, podendo ou não estar no mesmo sentido, tal como apresentado na Figura 4.5b. Um número pouco maior de spins assume um estado estacionário de menor energia alinhando-se no mesmo sentido do campo magnético, e um número pouco menor no sentido contrário. A magnetização resultante do tecido (M_0), conhecida como magnetização tissular, é dada pela soma das contribuições magnéticas individuais de cada spin. É este pequeno, porém constante desequilíbrio que torna a RM possível.

É importante compreender também que os prótons não se alinham precisamente ao longo do eixo do campo magnético B_0 , mas sim realizam um movimento de precessão em torno do mesmo, de forma análoga a um pião, que gira em torno de



Figura 4.6: Efeitos do campo magnético sobre a frequência de precessão.

seu eixo gravitacional. A frequência de precessão do núcleo de hidrogênio depende somente da potência do campo magnético aplicado sobre o mesmo. A relação entre frequência de precessão ω e potência de campo B_0 é descrita pela equação de Larmor 4.1 e é ilustrada na Figura 4.6.

$$\omega = \gamma B_0 \quad (4.1)$$

onde γ é a razão giromagnética de um determinado núcleo. No caso do hidrogênio, este valor é de 42,58MHz/T [59].

A magnetização tissular resultante intrínseca (M_0) é somente uma fração ínfima do campo magnético principal externo B_0 . Assim, enquanto M_0 estiver alinhada ao eixo de B_0 , como por exemplo o eixo longitudinal Z , é extremamente difícil de se realizar sua medição. Entretanto, a magnetização M_0 pode ser desviada, na direção do plano transversal (plano XY), quando então passa a ser denominada M_{xy} . Este desvio da direção de M_0 é obtido através de um pulso de RF oscilando na frequência de Larmor. Este pulso é aplicado até que haja um desvio de 90° da magnetização, sendo então medida através de uma antena receptora, tal como na Figura 4.7. A precessão de magnetização M_{xy} no plano transversal induz um sinal na antena receptora, e as aquisições repetidas deste sinal são digitalizadas e usadas na construção da imagem de RM [68].

Denomina-se tempo de relaxamento T_1 (longitudinal), o tempo necessário para que os spins recuperem 63% da magnetização na direção de B_0 após aplicado o pulso de RF. Em outras palavras, T_1 é o tempo necessário para que os spins retornem ao estado de equilíbrio de energia. Devido à variação de teor de hidrogênio em

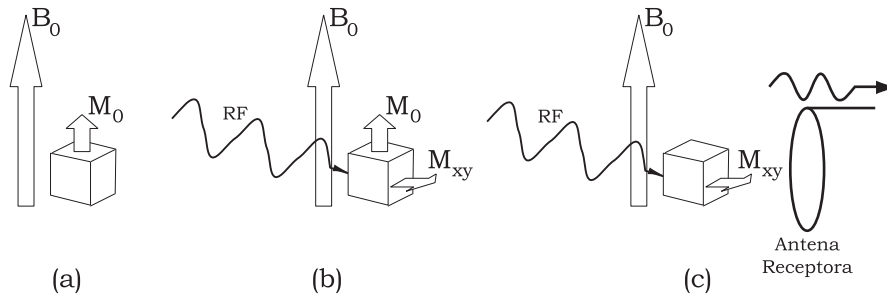


Figura 4.7: Processo de geração do sinal elétrico utilizado na construção da imagem de RM.

cada tipo de tecido, a quantidade de sinal gerada durante o processo de retorno ao equilíbrio de energia irá gerar diferentes gradientes de sinal a serem captadas pela bobina receptora. O contraste de uma imagem RM é baseado nos diferentes valores de relaxamento de T_1 .

Cada próton possui um campo magnético intrínseco, que começa a se desorganizar e a afetar núcleos vizinhos em uma reação simultânea, após cada pulso de RF. Durante este processo, ocorre uma transferência de energia entre os prótons, fazendo com que eles saiam de fase. Essa relação proton-proton, ou spin-spin, é também chamada de tempo de relaxamento T_2 (transversal).

Desta forma, os fatores que influenciam o contraste das imagens podem ser inerentes aos tecidos, e também, selecionáveis pelo operador do sistema. Entre os parâmetros inerentes aos tecidos pode-se citar a densidade de prótons e os tempos de relaxamento T_1 e T_2 . Já os parâmetros selecionáveis pelo operador são a escolha da seqüência de pulsos de RF utilizada, o ângulo de excitação dos núcleos, a espessura do plano de corte desejado e os agentes de contraste.

4.3 Construção das Imagens

O gradiente do campo magnético, produzido pelas bobinas de gradiente, é o artifício físico que torna possível a obtenção de imagens por RM, pois possibilita a localização do sinal de RM no espaço. O valor da variação promovida pelas bobi-

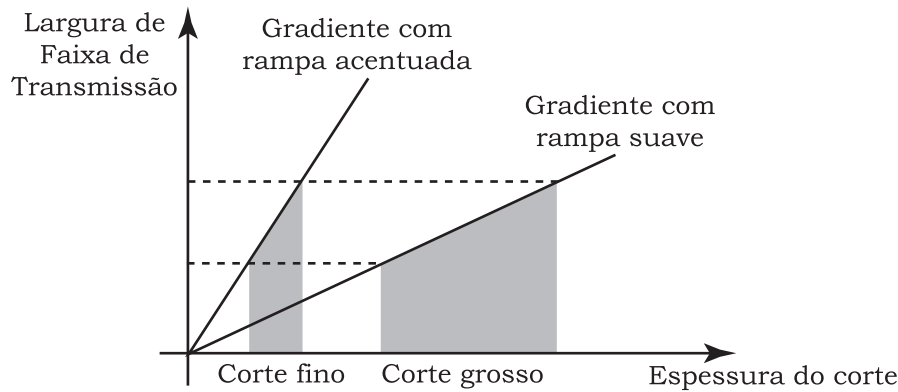


Figura 4.8: Largura da banda de transmissão e inclinação da rampa de gradiente versus espessura do corte.

nas de gradiente é efetivamente muito pequeno, tipicamente duas ou três ordens de grandeza inferior ao campo magnético estático do sistema [59]. Por exemplo, os gradientes são de 1,0 mT/m para um sistema de 0,5T.

Quando um gradiente de campo magnético se superpõe ao campo magnético estático existente, a frequência ressonante dos prótons varia juntamente com esse gradiente, e de acordo com o campo magnético local. Assim, a frequência dos prótons varia com a localização espacial ao longo do gradiente magnético aplicado. A codificação espacial do sinal é feita através de três operações: a seleção do plano de corte; a codificação de fase; e a codificação de frequência.

A seleção do corte [69] é feita utilizando-se a bobina de gradiente que altera o campo de maneira linear e conseqüentemente a frequência de precessão (Larmor). A magnetização dos spins de um corte em particular é desviada através de um pulso RF, na frequência de Larmor coincidente com a dos spins desejados. A espessura do corte pode ser manipulada através da largura de banda do pulso RF emitido, conforme a Figura 4.8. A etapa de codificação de frequência e a de codificação de fase ocorrem simultaneamente e praticamente se confundem. Na primeira, é feita a localização do sinal ao longo do eixo maior da anatomia, e na segunda a localização do sinal se dá ao longo do eixo menor da anatomia.

A etapa seguinte utiliza o conceito denominado por codificação de fases [70]. Considere uma fatia de tecido com apenas nove prótons, que vai ser localizada no espaço. A frequência dos spins é indicada pelo tamanho da elipse de precessão de cada próton, sendo a fase indicada pela direção predominante de cada precessão. Um gradiente é utilizado para selecionar a fatia do tecido, restando outros dois gradientes para codificar as duas dimensões espaciais restantes e formar a imagem.

O sinal captado pelas bobinas receptoras de RF é lido por detectores sensíveis à amplitude (brilho do pixel), e também à fase e frequência (localização do próton) do sinal [69]. Os dados coletados são organizados em uma matriz, de forma que no eixo horizontal são preenchidas informações de codificação de fase, e no eixo vertical, informações de frequência. Em seguida aplica-se a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) e obtém-se a imagem desejada. Uma imagem 256×192 , por exemplo, é composta de 256 amostras de frequência e 192 codificações de fase.

Análogo a qualquer sinal eletro-magnético, o sinal de RM também possui uma componente de ruído de fundo. De forma a melhorar a relação sinal-ruído, utiliza-se uma técnica de média de sinais, onde é calculada uma média aritmética dos sinais observados. O sinal de RM não é randômico e, portanto aumentará proporcionalmente ao número de observações efetuadas. Assim, cada aquisição de imagem pode ocorrer mais de uma vez, e este número de repetições é chamado de NEX (número de excitações).

Embora os efeitos básicos da densidade de prótons e tempos de relaxamento T_1 e T_2 sejam características importantes no processo de definição da intensidade de cores da imagem, existem ainda alguns fatores importantes que alteram a aparência da mesma. O modelo da geração de imagens por ressonância pressupõe que os objetos imageados fiquem estáticos durante todo o processo de aquisição. Entretanto, poderá existir um deslocamento espacial em função de algum movimento do organismo, seja este voluntário ou involuntário.

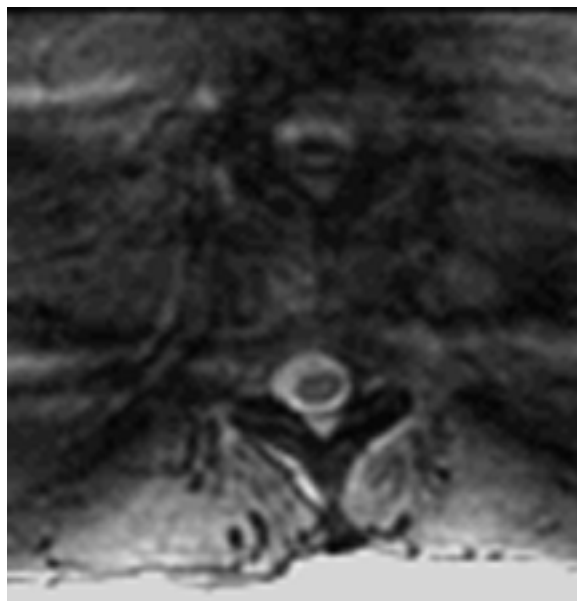


Figura 4.9: Imagem de um paciente apresentando duas colunas vertebrais. (Fonte: Departamento de Radiologia do Hospital St. Paul, Canadá [3])

Assim, o controle do movimento do objeto analisado, chamado movimento dos artefatos, também influencia na aquisição de uma imagem de boa qualidade técnica. Estes movimentos podem ser de três tipos: o respiratório, o cardíaco e do paciente.

O movimento do paciente pode ser atenuado através de uma conversa esclarecedora, ou até mesmo através de anestesia. A Figura 4.9 demonstra a imagem resultante do movimento do paciente no momento da aquisição do sinal [3].

Os movimentos cardíacos são minimizados através de *gating* periférico, onde a pulsação é detectada por um sensor no dedo do paciente, ou pelo ECG *gating*, onde a pulsação é detectada por eletrodos no tórax do paciente. Em ambos os casos, cada corte de imagem é adquirido na mesma fase do ciclo cardíaco [3].

Os movimentos respiratórios são minimizados através da compensação respiratória, do monitoramento da respiração, da aquisição de acordo com o movimento respiratório, ou mesmo através do aumento do NEX. Neste caso, a codificação de fase é realizada em intervalos randômicos, produzindo um fantasma na imagem. As repetidas aquisições da mesma imagem tendem a cancelar os erros e conseqüentemente a

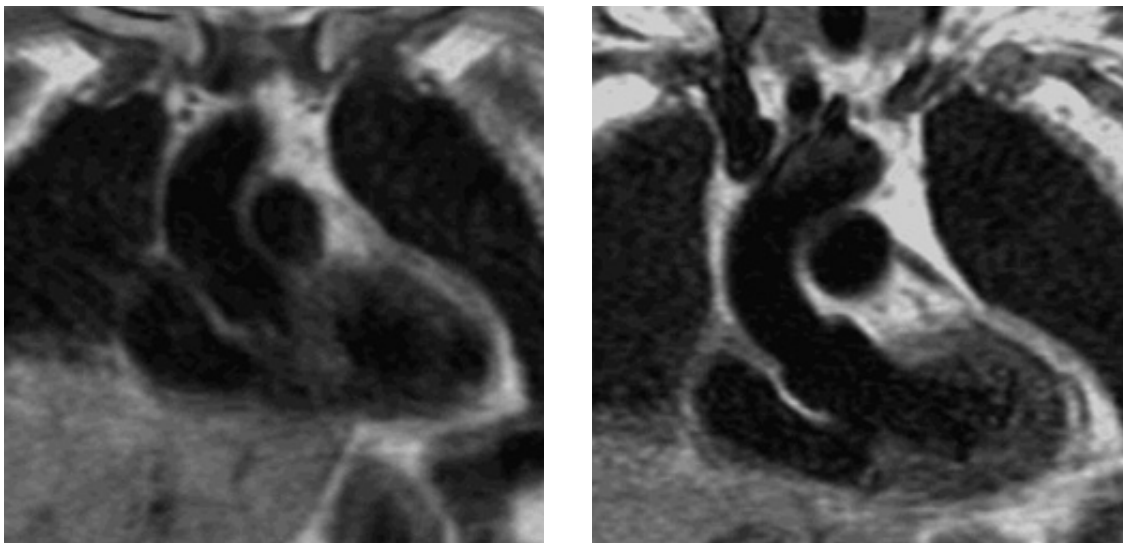


Figura 4.10: À esquerda uma imagem do coração obtida sem controle do movimento e a direita obtida com controle do movimento. (Fonte: Departamento de Radiologia do Hospital St. Paul, Canadá [3])

imagem tende a ser melhorada, tal como ilustrado na Figura 4.11.

4.4 Agentes de Contraste

A maioria das modalidades de imageamento utiliza, em alguns exames, agentes de contraste para realçar as diferenças entre os tecidos. Os agentes são injetados no corpo humano, sendo gradativamente absorvidos pelo organismo, de acordo com a capacidade de absorção dos mesmos por cada tecido orgânico. Os agentes de contraste de exames de radiografia convencional e Tomografia Computadorizada, por exemplo, bloqueiam a passagem dos fótons de raios-X.

O contraste em exames de RM funciona alterando o campo magnético local do tecido que se encontra sendo examinado. Os tecidos normais e anormais respondem de modo diferente para esta pequena alteração, fornecendo sinais distintos durante o procedimento de aquisição da imagem. A Figura 4.12 apresenta o efeito dos agentes de contraste em uma imagem.

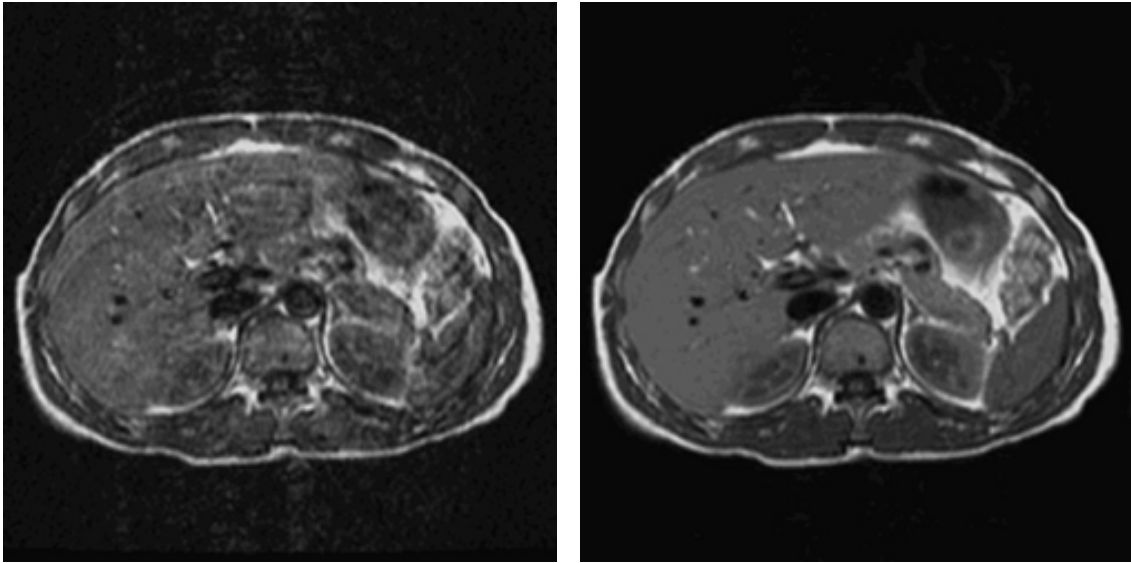


Figura 4.11: A imagem à esquerda exibe um corte do tórax onde a respiração do paciente provocou um efeito de borramento das estruturas internas. A imagem à direita exibe o mesmo corte, aumentando o NEX para 16. (Fonte: Departamento de Radiologia do Hospital St. Paul, Canadá [3])

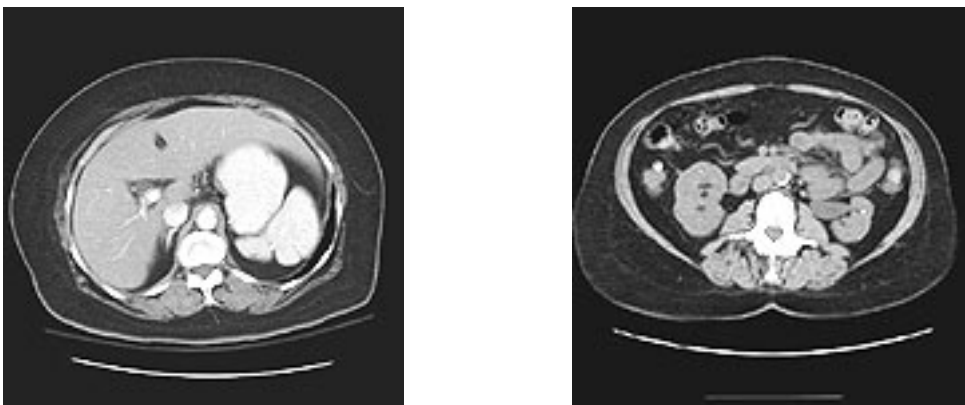


Figura 4.12: A imagem à esquerda exibe um corte sem o uso de agentes de contraste, e à direita com o uso de agentes de contraste. (Fonte: Hospital St. Michael, Canadá [4])

Os agentes paramagnéticos são os mais utilizados para auxiliar no contraste de uma imagem de RM. Entre os agentes utilizados, o gadolínio Gd^{3+} é o que produz o realce mais marcante, porém é extremamente tóxico ao corpo humano. Por este motivo ele é utilizado em conjunto com quelantes que tornam o agente hidrossolúvel, e assim facilmente eliminado posteriormente na urina.

O nível de oxigenação do sangue pode ser visualizado nas imagens de RM. A oxi-hemoglobina, principal hemoglobina do sangue arterial, possui uma propriedade diamagnética, isto é, quando submetida a um campo magnético, ela se alinha na mesma direção do mesmo, porém em sentido contrário. A desoxi-hemoglobina presente no sangue venoso, é produzida após o oxigênio ter sido consumido pelos tecidos, e possui propriedades paramagnéticas, ou seja, alinha-se na mesma direção e sentido do campo magnético ao qual ela é submetida. Desta forma, a oxi e desoxi-hemoglobina podem ser mensuradas através de exames de ressonância, e ainda, podem servir como um agente de contraste magnético intrínseco em alguns exames de RM, tal como exames de cérebro. O uso da hemoglobina como um agente de contraste será mais bem compreendido na Seção 4.5.

4.5 Ressonância Magnética Funcional

A Ressonância Magnética Funcional (RMf) mede dinamicamente variações de sinal resultantes da ativação neural do cérebro. O córtex é imageado pelo aparelho de RM com baixa resolução devido à característica dinâmica do processo, porém com alta taxa de amostragem, tipicamente uma vez a cada 2 – 3 segundos. A variação da atividade neural provoca mudanças no sinal de RM através de um mecanismo chamado efeito BOLD (*blood oxygen level-dependent*).

A atividade neural provoca um aumento na demanda dos neurônios por oxigênio, elevando significativamente a taxa entre a quantidade de oxi-hemoglobina e desoxi-hemoglobina. Uma vez que a desoxi-hemoglobina reduz a intensidade do sinal de RM, a resposta vascular leva a um aumento da intensidade do sinal que está diretamente correlacionada com a atividade neural.

A partir da relação entre a oxi-hemoglobina e a deoxi-hemoglobina, a RMf utiliza o nível de oxigênio para determinar possíveis variações da atividade cerebral. As propriedades magnéticas das hemoglobinas variam de acordo com a quantidade de oxigênio presente nas mesmas. Desta forma, o exame de RM funcional captura a alteração do magnetismo em regiões do córtex, e correlaciona a atividade cerebral através de uma função do nível de oxigenação, conhecido como efeito BOLD. A RMf oferece uma medida indireta do aumento local da atividade neural em resposta a estímulos sensoriais, ou durante a realização de tarefas motoras e mentais.

Atualmente, o completo entendimento da natureza da relação entre a atividade neural e o sinal BOLD, ainda é um assunto de pesquisas. Este mecanismo, ainda que não completamente compreendido, oferece um método importante para a medição e o mapeamento da atividade cerebral.

Conforme o aumento do nível de desoxi-hemoglobina nos vasos sanguíneos, é gerada uma diferença de susceptibilidade magnética. Neste instante, ocorre uma variação de fase no sinal de ressonância dos prótons, o que na teoria, tornaria porções da imagem mais escuras que o normal, ou seja, localmente existiria uma queda do sinal captado. Desta forma, seria esperado que com o aumento da atividade neural, haveria um aumento no consumo de oxigênio, e conseqüentemente um aumento do nível de desoxi-hemoglobina.

Entretanto, isto não é verdade pois simultaneamente ao aumento do consumo de oxigênio, ocorre um aumento do fluxo de sanguíneo, trazendo mais oxi-hemoglobinas, aumentando o diamagnetismo, e assim amplificando o sinal. O aumento do fluxo de sangue para o cérebro se dá através da dilatação dos vasos sanguíneos, o que resulta em um crescimento de 20 – 40% do volume de sangue fornecido pelos mesmos [26].

A Figura 4.13 ilustra um exemplo de imagens RMf da atividade cerebral. Neste exemplo, as áreas destacadas representam a ativação cerebral resultante de um estímulo à sensação de desagrado. O Capítulo 5 irá explanar mais claramente sobre o uso dos exames de RMf na medição da ativação cerebral.

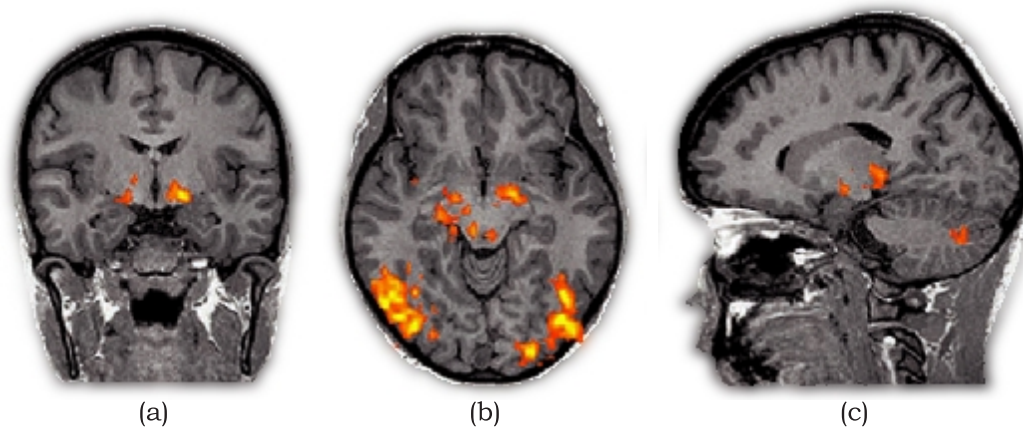


Figura 4.13: Ativação cerebral resultante de um estímulo induzido. Cortes segundo os planos: (a) coronal; (b) transverso; (c) sagital. (Adaptado de Moll *et alli* [5])

4.6 As Controvérsias em Torno da Ressonância Magnética Funcional

A resolução espacial da RMf (veja Seção 4.5), que tipicamente situa-se na faixa de $1,2mm^2$ em uma imagem plana, é relativamente pobre se comparada às dimensões de um neurônio, isto é $6,4nm^2$. Assim, pode-se afirmar que as imagens de RMf capturam um efeito de massa do comportamento da atividade neuronal. Em trabalhos recentes, já se conseguiu que essa definição fosse reduzida para a escala submilimétrica de $0,25mm^2$ em imagens geradas com seres humanos [71] e para $0,015mm^2$ em experimentos realizados com animais [72].

A despeito do esforço empregado nesse sentido, é bem sabido que a resolução espacial em RMf não pode aumentar indefinidamente, pelo menos aquela baseada em alterações hemodinâmicas, tal como o efeito BOLD. Existem evidências de que o mecanismo regulador de fluxo sanguíneo local se dá dentro de um domínio submilimétrico [73]. Neste sentido, é estabelecido nesse nível um limite intrínseco em termos de resolução espacial para qualquer método de neuroimagem baseado em hemodinâmica, incluindo a RMf.

A resolução temporal (veja Seção 4.5) também é limitada por fatores intrínsecos a essa metodologia, que implicam em uma taxa de amostragem de $2s$. Este valor é algumas ordens de grandeza superior ao tempo de ativação de um neurônio, que leva menos de $1ms$, desde o início da ativação até o término do decaimento. Contudo, Ogawa e Kim, um dos pioneiros em RMf, demonstraram recentemente que é possível planejar experimentos que permitam obter informações na escala de milisegundos [73].

Na esteira dos avanços científicos e tecnológicos mais recentes, o uso de técnicas multimodais surgiu como uma abordagem inovadora, permitindo ampliar as possibilidades de uso da RMf, combinando-a com outros métodos dotados de capacidades complementares. O uso combinado do Eletroencefalograma (EEG) com a RMf constitui um bom exemplo nesse sentido. As alterações de potenciais elétricos registrados pelo EEG, além de estarem diretamente associadas à atividade neuronal, podem ser medidas com precisão de milisegundos. A aplicação simultânea dessas duas técnicas em um único experimento tem sido vista como uma forma de superar suas limitações intrínsecas e de potencializar suas virtudes.

Um estudo recente [74], realizado com o uso combinado de EEG e RMf, permitiu obter, detalhes das respostas hemodinâmicas associadas a alterações da atividade cerebral relacionadas com a epilepsia. Observou-se que tais respostas hemodinâmicas apresentam aspectos bastante diferentes do padrão habitual, observado em situações envolvendo exames convencionais de RMf. É bem possível que essas respostas hemodinâmicas alteradas venham a se constituir em pistas fundamentais no esforço para se desvendar os mecanismos de base subjacentes a essas disfunções cerebrais.

Além, da questão espacial e temporal, existem também algumas questões polêmicas a respeito dos limites e das conclusões que se pode chegar a partir de exames de RMf. Mais especificamente, existem divergências sobre quais conclusões podem ser feitas sobre a forma com que se relacionam a atividade neural, o fluxo de sangue no cérebro e os sinais de RMf [75]. Por exemplo, Heeger e Ress [75] chamam a atenção que a RMf é uma medida indireta da ativação cerebral, e ainda, da fragilidade do seu modelo de transformação linear. Este modelo utiliza uma fórmula matemática

para interpretar os resultados de RMf, determinando que a intensidade do sinal de RMf é proporcional à atividade neural local, que corresponde a um valor médio de um espaço milimétrico durante alguns poucos segundos.

Apesar de Heeger e Ress concluírem que o modelo linear de transformação é uma aproximação aceitável para retratar estas ativações, eles afirmam que isto é aplicável somente a algumas áreas do cérebro, e ainda, mediante um seletivo conjunto de experimentos. Além disto, Heeger e Ress também chamam a atenção para o fato de que alguns estímulos semelhantes podem produzir imagens de RMf distintas em um mesmo indivíduo, o que pode caracterizar uma certa instabilidade da medida.

Em artigo recente, Dobbs [76] aponta que diversos neurocientistas demonstram preocupações relacionadas com o uso da RMf, com as limitações do método, e com a confiabilidade das conclusões obtidas a partir de imagens de RMf. Ele questiona se a utilização em larga escala do exame de RMf não estaria associada ao fato de que ele fornece resultados mais precisos quando comparado com métodos mais antigos, sob o ponto de vista espacial e temporal simultaneamente. Dobbs também indica que alguns críticos entendem que a busca pela localização das funções mentais nada mais é do que uma variação moderna e tecnológica da antiga frenologia do século XIX (veja Seção 3.3).

Além disto, existem críticas relacionadas com: (1) a capacidade de se realizar generalizações sobre o cérebro de indivíduos usando dados de RMf a partir de pequenos espaços amostrais, (2) o uso em aplicações forenses questionáveis (uso de resultado de RMf usados como evidências nas cortes de justiça), e (3) o emprego em aplicações de neuromarketing (usar RMf para saber como os consumidores respondem a certos tipos de produtos) [77].

Recentemente, foi relatada a tentativa de se criar um detector de mentiras baseado em tecnologia de RMf. Resultados preliminares indicam que quando um indivíduo mente, seu córtex cingular anterior e o giro frontal superior são ativados. Entretanto, outros estudos indicam que a ativação do córtex cingular anterior ocorre em uma variedade de situações nas quais um indivíduo realiza uma tomada de decisão [78], e

não somente quando ele decide mentir, ou dizer a verdade. Langleben, responsável pela condução dos experimentos relacionados com o detector de mentiras admite que serão necessários alguns anos até que a tecnologia esteja madura para o uso comercial [77].

Estas aparentes contradições significam que o uso da RMf é controverso. Por um lado, a RMf é tida como um exame importante e serviu de base técnica para centenas de estudos neurocientíficos nos últimos anos. Por outro lado, podem ser identificadas críticas sustentáveis à técnica de RMf. Entende-se que dada a ausência de um exame mais preciso, recomenda-se o uso das formas disponíveis de medição de modo a viabilizar o avanço gradual da pesquisa. Entretanto, não se deve negligenciar que toda medida possui uma imprecisão, e cabe ao pesquisador avaliar o quanto este erro pode influenciar no seu experimento.

Além disto, também existe uma questão relacionada com a hierarquia dos processos computacionais cerebrais. Neste contexto, existe a possibilidade de que alguns poucos neurônios sejam responsáveis pelo controle do processo computacional distribuído do cérebro. Desta forma, estes poucos neurônios gerenciais realizariam um baixo consumo de oxigênio, enquanto que os neurônios ditos operários, realizariam um alto consumo de oxigênio. O exame de RMf não estaria capturando a ativação dos neurônios gerenciais, mas sim dos neurônios operários. Entende-se que o reconhecimento de padrões através de RMf, conforme proposto nesta Tese, não é problema significativo pois o fenômeno macroscópico é considerado a característica determinante. No entanto, esta questão levanta a possibilidade de que o padrão de ativação cerebral por si só pode não explicar de fato quais as áreas importantes envolvidas.

Assim, ainda que o exame de RMf apresente significativas imprecisões comparadas com as ordens de grandezas associadas ao tamanho de um neurônio e de seu tempo de ativação, tem-se um modelo aproximado e eficiente de medição com vistas ao mapeamento aceitável do macro fenômeno de ativação cerebral.

Capítulo 5

Estudo da Ativação Cerebral

Neste capítulo são apresentados os trabalhos mais recentes sobre o estudo espacial do processo de ativação neural do ser humano, mediante estímulos morais e emocionais. Em linhas gerais, a pesquisa sobre o tema proposto nesta Tese é conduzida por equipes multidisciplinares, nas quais observa-se um crescente, porém gradual, envolvimento de profissionais com formação em computação.

Entende-se que uma forma adequada para apresentar a pesquisa bibliográfica, relacionada com o estudo das emoções, é através de um diagrama de *brainstorm*, tal como ilustrado na Figura 5.1. Neste sentido, observa-se que o estudo pode ser dividido em dois grandes grupos. O primeiro está relacionado com trabalhos mais clássicos associados a pesquisas sobre o hemisfério direito e a assimetria da ativação cerebral. O segundo agrupamento, está relacionado a trabalhos mais recentes, voltados para o estudo das emoções primárias e secundárias. A pesquisa sobre emoções secundárias é realizada segundo duas linhas de ação, aquela relacionada com o processo de tomada de decisão e aquela relacionada com a questão da moral.

Além disto, a pesquisa atual se desenvolve em várias frentes que freqüentemente se permeiam, ou até mesmo, se sobrepõe. Em uma primeira análise, os trabalhos nesta área parecem estar dispersos, ou pouco alinhados com o objetivo principal. Entretanto, esta característica é natural quando se explora as fronteiras do Conhecimento. Entende-se que os estudos têm ampliado a compreensão do homem sobre seu cérebro, e que a diversidade desta investigação está relacionada à amplitude desta área de conhecimento. Não são raras as situações em que os estudos de fun-

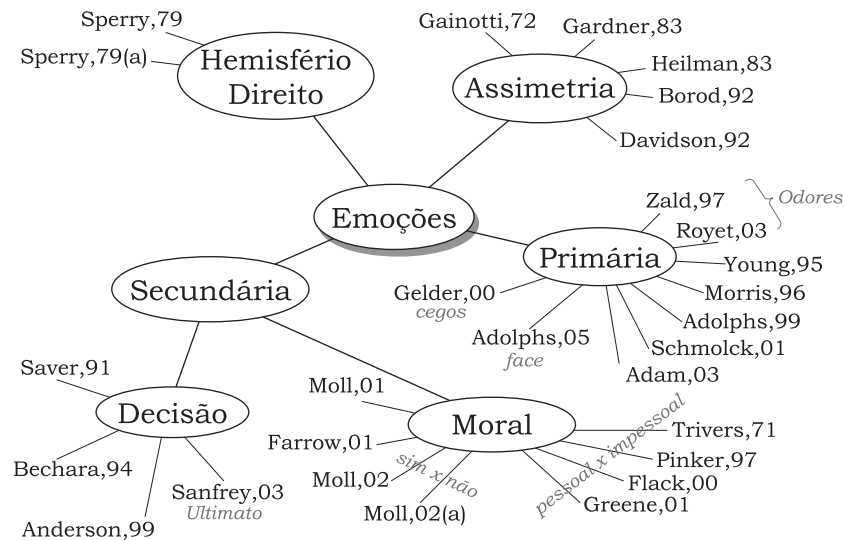


Figura 5.1: Diagrama de *brainstorm* da revisão bibliográfica.

cionalidades distintas podem ser combinados a fim de atingir uma compreensão mais elevada sobre o complexo funcionamento do cérebro.

Trabalhos sobre a percepção de odor e sobre o sentimento de emoção, por exemplo, poderiam ser facilmente considerados disjuntos. Entretanto, os odores são tidos como capazes de influenciar o temperamento das pessoas, ou induzir um estado de alerta, ou de relaxamento, evocando memórias emocionais antigas e esquecidas. A relação estreita entre o olfato e a emoção, particularmente odores altamente aversivos, começou a ser estudada por Zald e Prado [79], e ficou evidenciada a ativação da área esquerda da amígdala durante o processo de estímulo pelo odor. Por este motivo, Royet *et alli* [80] estudaram os efeitos de odores no estímulo das emoções em grupos de homens e mulheres, constatando uma ativação cerebral maior neste último.

Um trabalho que ilustra a multidisciplinaridade deste tema é o artigo de Sanfrey *et alli* [16] que busca uma relação entre a ação de tomada de decisão e o funcionamento lógico do cérebro. Ele emprega técnicas de neuroimagens funcionais para investigar a relação da contribuição cognitiva e da contribuição emocional no processo de tomada de decisão. O experimento utiliza como artifício o jogo do Ultimato, descrito na seção

2.7, sendo o espaço amostral composto por 20 jogadores, os quais 19 são humanos e 1 é um computador. O exame de RMf é realizado no cérebro do indivíduo que se encontra na posição de respondedor. Os participantes foram informados que o jogo seria executado uma só vez com cada um dos adversários, e que sua decisão em cada jogada não seria revelada aos outros. Desta forma, a interação tornou-se um jogo simultâneo de informação incompleta, e, portanto o conhecimento das ofertas anteriores não poderia afetar a decisão dos jogadores durante a rodada.

Nas situações em que ambos jogadores eram humanos, observou-se que ofertas tidas como injustas estavam relacionadas com uma ativação de áreas cerebrais tais como a ínsula bilateral anterior, o córtex préfrontal dorso lateral e o córtex cingular anterior. A magnitude da ativação também foi maior com parceiros humanos, do que quando a oferta era feita por uma máquina. Neste sentido, o trabalho sugere que a ativação não é apenas função da quantidade de dinheiro oferecido ao jogador, pois em princípio, qualquer oferta deveria ser aceita, indicando que a decisão também possui caráter emocional. Ao mesmo tempo, há uma característica única que mostra uma sensibilidade ao contexto em que as ofertas são realizadas. Esta característica é materializada através do tratamento distinto dado pelos respondedores quando conscientemente os responsáveis por realizar as ofertas eram humanos, e quando o responsável era o computador.

5.1 Moral

O desenvolvimento dos estudos da psicologia moral que dominaram as teorias racionais por séculos, enfatizaram o papel das emoções, principalmente das secundárias, no desenvolvimento de um comportamento moral [81]. As emoções secundárias têm sido o foco de uma série de estudos, e se diferenciam das emoções primárias porque estão intrinsecamente ligadas a interesses e ao bem-estar da sociedade como um todo, ou mesmo de indivíduos [30, 82, 83, 84]. As emoções secundárias são facilmente evocadas através da percepção de uma violação moral. Foi sugerido que, ao contrário do raciocínio lógico elaborado, estas emoções são eventos cognitivos inconscientes, automáticos e rápidos [81].

Casebeer [85] identifica que o mecanismo de cognição moral é um desafio a ser estudado, principalmente porque é dividido em vários subprocessos e altamente distribuídos no cérebro. Para estudar o mecanismo neural de cognição moral é necessário delimitar qual o domínio da teoria moral que será considerado: o utilitarismo, o deontologismo, ou o virtuosismo.

O utilitarismo defende que um indivíduo deve tomar a ação que, uma vez realizada, produzirá a maior quantidade de satisfação a um maior número de sentimentos possíveis. Sob esta ótica, a satisfação é representada pela presença de prazer, ou ausência de dor. O deontologismo, por sua vez, tem que a maximização da satisfação não é o objetivo principal, mas sim, que o importante é a não violação dos direitos de outros membros da sociedade. Por fim, o virtuosismo envolve a maximização das virtudes e minimização dos vícios.

Apesar das dificuldades, a ligação entre a tomada de decisão moral, a cognição social e as emoções já começa a se tornar mais evidente. Resultados convergentes de estudos sobre lesões através de imageamento indicam que avarias ventrais e mediais do córtex préfrontal estão consistentemente associadas a más tomadas de decisão [86, 87, 30, 88]. Pacientes desta natureza apresentam uma anormal ausência de reações emocionais, quando lhes são mostradas figuras de conteúdo emocional. Estes indivíduos deveriam exibir ativações cerebrais conforme aquelas apresentadas em imagens de RMf de pacientes saudáveis, relatadas por Moll *et alli* [5, 89].

Neste sentido, Moll *et alli* [5] investigaram a correlação neural da emoção moral em indivíduos normais utilizando imagens de RMf. Devido aos comportamentos anti-sociais associados aos acidentes no lóbulo orbital frontal, especulava-se sobre a possibilidade dessa região do cérebro ser mais ativada por estímulos visuais que despertassem as emoções morais, o que se mostrou correto.

Atualmente, tem-se que o entendimento dos valores morais consiste na compreensão de duas questões chave [90]: (1) o porquê do homem se preocupar tanto com a ação de outros indivíduos, ainda que esta não lhe afete; (2) como se dá o processo decisório de qualificar a atitude de uma pessoa como boa ou ruim. No pas-

sado, existia uma controvérsia se os julgamentos morais eram produtos de processos emocionais e não racionais, ou se eram fruto do pensamento lógico combinado com uma cognição mais apurada. Greene chama a atenção para o fato de que os recentes estudos de diversas áreas da neurociência cognitiva apontam para a convergência em uma resposta: ambos, o pensamento lógico e o emocional, desempenham papel importante, mas os processos emocionais automáticos tendem a dominar o julgamento moral [84]. Sob esta ótica, tem-se mais um indício de que a emoção está integrada no processo de tomada de decisão e de planejamento.

Moll *et alli* [91, 89] realizaram experimentos para identificar as áreas cerebrais ativadas por um estímulo de resposta moral. Neste experimento foram apresentadas aos indivíduos, frases simples contendo valores morais (ex: "Eles enforcaram um inocente") e outras sem valor moral (ex: "Pedras são feitas de água"). Exigia-se destas pessoas que refletissem sobre o assunto que lhe fora exposto. Nos casos em que a frase continha algum conteúdo moral, registrou-se a ativação cerebral no pólo frontal bilateral, no giro medial frontal, no cerebelo direito, no pólo temporal direito, no sulco temporal superior e no córtex orbitofrontal esquerdo.

Moll *et alli* [5] também realizaram uma segunda experimentação envolvendo valores morais estimulados através da exibição de fotografias com conteúdo moral, tais como imagens de assaltos violentos, de crianças pobres abandonadas, entre outras. A região medial frontal e a área posterior do cíngulo foram também ativadas, resultados consistentes com um experimento envolvendo empatia e pena proposto por Farrow *et alli* [92]. As áreas relacionadas com este tipo de ativação são: BA7, 9, 10, 11, 31, 39.

Enquanto Moll estuda a cognição moral fazendo uma distinção entre fenômenos morais e não morais, Greene *et alli* [93] concentram-se apenas no domínio do moral. Neste sentido, eles tentam fazer uma distinção entre julgamentos morais pessoais e impessoais, utilizando como artifício para a geração dos estímulos morais a apresentação de diversos dilemas envolvendo a tomada de decisão.

Um destes dilemas é conhecido como Dilema do Carro Elétrico [93]. Um carro elétrico desgovernado segue em direção a cinco pessoas que serão mortas caso ele

permaneça no curso atual. A única forma de salvá-las é pressionar um botão que irá desviar o carro para uma via alternativa, resultando na morte de uma outra pessoa, ao invés das cinco anteriores. Quando chamadas a decidir sobre o que deveria ser feito, a maioria das pessoas concorda que pressionar o botão é a solução mais acertada.

Em um problema similar, conhecido como Dilema da Passarela [93], um carro elétrico ameaça a vida de cinco pessoas tal como no Dilema do Carro Elétrico. Contudo, a pessoa que é levada a decidir está ao lado de um indivíduo muito gordo, em cima de uma passarela, situada entre o grupo de cinco pessoas em perigo e o carro elétrico. O único modo de salvar o grupo de cinco pessoas é empurrar o indivíduo gordo da passarela para a trajetória de colisão do carro. Ele irá morrer se a pessoa assim o fizer, mas seu corpo irá evitar que o carro atinja as cinco pessoas iniciais. Quando perguntado se as pessoas empurrariam o gordo, a maioria responde que não.

Estes dois dilemas criam confusão no estudo da moral, basicamente pela observação de um comportamento antagônico para salvar as vidas de cinco pessoas ao custo de uma única. Flack [94] chama atenção para o fato de que muitos instintos sociais do homem foram herdados dos primatas, e entre estes instintos está aquele responsável pelas tendências de um indivíduo ferir outro. Trata-se de instintos emocionais, disparados por comportamentos e estímulos presentes no ambiente dos ancestrais do homem. Este ambiente não compreendia oportunidades de causar danos a outros, usando maquinário complicado e de ação remota, mas sim colocando indivíduos em situações de perigo iminente, tais como empurrando-o de um desfiladeiro, jogando-o dentro de um rio caudaloso, entre outras. Assim, supõe-se que a violência interpessoal básica, que era uma ameaça real e bem conhecida dos ancestrais do homem moderno, o estimule de forma determinística. A violência moderna, por sua vez, ainda não foi assimilada pela evolução e, portanto não desperta esta sensação.

Para Greene [90] uma violação moral é pessoal se: (1) causar um dano corporal sério, (2) direcionada a uma pessoa em particular, (3) o dano não é resultado de

um redirecionamento de uma ameaça já existente, mesmo quando de menor probabilidade de ocorrência. A violação não moral, por sua vez, é aquela que falha em atender a algum destes critérios. Empurrar alguém para frente do carro elétrico é uma atitude que abrange os três critérios e, portanto é pessoal. Já alterar a rota do carro envolve um redirecionamento de uma ameaça existente, ainda que pequena, e portanto, caracterizando a violação como impessoal.

Argumenta-se que dilemas, tais como o da passarela, envolvem um processamento emocional de um nível maior do que aqueles excitados pelo Dilema do Carro Elétrico. Esta diferença no engajamento emocional afetaria o julgamento das pessoas [95, 96, 94, 93]. Greene [93] realizou uma bateria de experimentos envolvendo com 60 dilemas práticos (veja [97]) divididos em duas categorias: morais e não morais. Os dilemas morais foram classificados como pessoais e impessoais, de acordo com o critério apresentado anteriormente. Nove participantes responderam aos 60 dilemas, sendo imageados por equipamentos de RMf. Nos julgamentos morais pessoais, observou-se a ativação das áreas de Brodmann 7, 9, 10, 31, 39. Nos dilemas classificados como morais impessoais, observou-se a ativação das áreas 7, 9, 10, 31, 40, 46. Para maiores detalhes sobre as áreas de Brodmann veja a Figura 3.4.

5.2 Medo

Hoje, sabe-se que a chave para a compreensão do mecanismo do medo está em uma pequena área do cérebro chamada amígdala. Macacos, por exemplo, perdem seu medo de cobras, e ratos perdem o medo de gatos, como resultado de danos na amígdala. LeDoux [98] argumentou que problemas na amígdala evitam que se aprenda sobre estímulos que sinalizam a presença de perigo. Todavia, o mecanismo através do qual um dano na amígdala compromete o reconhecimento do medo, ainda não foi identificado.

O medo é uma reação normal a situações de ameaça, sendo muito comum no dia a dia. Quando o medo torna-se maior que o exigido por uma determinada situação, ou então, quando surge em situações desnecessárias, caracteriza-se este estado anômalo de desordem de ansiedade [99]. Esta seção não irá considerar este

tipo de circunstância.

Adolphs *et alli* [100] foram os primeiros a estudar a capacidade do homem de reconhecer o medo através de expressões faciais. Desde então, a importância da amígdala em processar informações, em especial aquelas oriundas de expressões faciais, tem sido amplamente estudada [101, 102, 103, 104, 105]. Neste tipo de estudo, um fator complicador é classificar diversas expressões faciais, de acordo com seu tipo, isto é, rotular um conjunto de imagens retratando o medo, a felicidade, a tristeza, entre outros. Em geral, existirão casos em que não haverá unanimidade sobre uma determinada classificação. Isto implica que o conjunto de controle do experimento, o qual *a priori* deveria ser irrefutável, pode levar a resultados questionáveis.

Neste sentido, é desejável utilizar um conjunto amostral de expressões faciais único a fim de viabilizar a reprodução do experimento na sua totalidade. Encontra-se na literatura diversos experimentos que não se preocupam com sua base amostral. Nesta Tese, foram considerados apenas aqueles experimentos que utilizam uma base única, a base de dados de Ekman [106], que tende a ser bem aceita pela comunidade científica.

Mais recentemente Adolphs *et alli* [107] relataram um trabalho curioso no qual um mesmo paciente com danos na amígdala foi estudado por dez anos ininterruptos. Desde o princípio, este paciente era incapaz de identificar as expressões faciais associadas ao medo, como era de se esperar. Entretanto, tinha-se como certo de que, se fosse possível ensinar a este paciente como identificar características da face do ser humano que sinalizavam determinados tipos de emoção, esse paciente patológico tornar-se-ia capaz de reconhecer uma expressão facial de emoção.

Gosselin *et alli* [108, 109] desenvolveram um algoritmo computacional robusto de processamento de imagens para identificação de expressões faciais, o qual é conhecido atualmente como *Bubbles*. Adolphs acreditava que teoricamente se era possível ensinar uma máquina a reconhecer estes padrões, então bastaria ensinar ao seu paciente o mesmo algoritmo, sendo que ele passaria a ser capaz de identificar estas emoções.

Na prática, entretanto, isto não se mostrou verdadeiro. Adolphs *et alli* [107] relatam que seu paciente mostrou-se incapaz de coletar as dicas necessárias para a execução do algoritmo. Isto porque não conseguia direcionar seu sistema visual para a busca dessas dicas, de forma a fixá-las e lhes dar atenção. Assim, ao contrário do que LeDoux sugeria [98] sobre o impedimento oferecido por danos na amígdala para aprender sobre estímulos que sinalizam a presença de perigo, Adolphs *et alli* sugerem que o problema não está na interpretação dos dados, mas sim no processo de captura dos mesmos. Schmolck e Squire [104] também já haviam despertado para este problema, porém pesquisavam danos em uma outra região do cérebro, o lobo anterior temporal.

Hoffman *et alli* [110] e Gelder *et alli* [111] sugerem que expressões faciais de medo, prazer, desgosto e tédio são conseqüências diretas do processamento das emoções. Seus estudos são particularmente interessantes, pois utilizam um espaço amostral composto por pessoas cegas de nascença. Em princípio, estes indivíduos não poderiam reproduzir as mesmas expressões faciais emocionais de pessoas videntes, uma vez que não poderiam imitá-las. Entretanto, relata-se que as expressões faciais são similares, apontando para o fato de que o mecanismo é inato.

5.3 Bancos de Dados de Neuroimagens

Conforme observado, a tarefa de se compreender o cérebro humano, em toda sua complexidade, tem sofrido diversos avanços em todos os níveis de conhecimento. A diversidade de técnicas utilizadas para estudar o cérebro e o atual conhecimento dos sistemas nervosos, não possui paralelo na história da ciência moderna. Além disto, existe um crescente número de artigos, jornais e congressos dedicados a cada aspecto das funções cerebrais. Em virtude deste cenário, muitos dos pesquisadores são levados a ser tornarem altamente especializados, a fim de poderem assimilar rapidamente o crescente volume de informações. Como resultado desta situação, observa-se uma fragmentação das informações e uma conseqüente, dificuldade no acesso às mesmas.

A compreensão da estrutura e do funcionamento do sistema nervoso, claramente exige o gerenciamento e a integração de uma grande quantidade e variedade de dados, apontando para a necessidade de um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD). Neste sentido, levando o estudo para o âmbito computacional, é desejável um esquema de banco de dados organizacional, que permita analisar a relação entre dados oriundos de diferentes experimentos baseados em metodologias distintas. Portanto, o objetivo destes SGBDs computacionais é o de viabilizar e padronizar o estudo de uma ampla gama de aspectos do cérebro, em diferentes pacientes e metodologias distintas.

Os bancos de dados desta natureza prometem exequiabilizar esta integração e compartilhamento das neuroimagens necessárias para impulsionar o estudo do cérebro [112]. Indubitavelmente, a integração das informações alcançada através de bancos de dados computacionais irá colaborar positivamente para que se alcance uma redução dos elevados custos oriundos das experimentações em equipamento de RM.

Os imageadores modernos que produzem as imagens utilizadas nos estudos do cérebro encontram-se em um elevado grau de desenvolvimento, permitindo que qualquer centro acadêmico, ou clínico, contribua para a pesquisa científica das imagens neurofuncionais. Os *softwares* já suportam a construção de bancos de dados com mecanismos de busca que possibilitam consultas baseadas em lógica booleana e lógica *fuzzy*. A atual estrutura de armazenamento de imagens tridimensionais facilita a indexação e o uso de sistemas de coordenadas cartesianas. O desenvolvimento e a aplicação de normalizações espaciais, bem como os algoritmos de deformação geométricas (*warping*), permitem realizar comparações dos dados de diferentes pacientes de forma acurada.

Atualmente, os bancos de dados de neuroimagens podem assumir duas formas. Na primeira, os bancos de dados são simples catálogos de imagens volumétricas, funcionando de forma similar aos *Picture Archival and Communication Systems* (PACS) empregados nos ambientes clínicos [113, 114]. Tais sistemas de arquivamento são geralmente utilizados em laboratórios para facilitar a tarefa de gerenciamento de seus acervos de imagens. A segunda forma está relacionada com o armazenamento das

informações sobre o experimento, envolvendo a combinação da imagem neurológica com os dados descritivos do experimento [115, 116, 117].

Existem diversos exemplos de atlas eletrônicos do cérebro. Dentre eles pode-se citar os atlas de ratos [118, 119], macacos [120, 121], camundongos [122, 123] e seres humanos [124]. Além disto, existem diversas páginas da Internet contendo atlas eletrônicos em diversos estágios de complexidade (para uma lista detalhada, sugere-se uma consulta a página do *Laboratory of Neuro Imaging - LONI* [125]). Apesar de nenhum destes bancos de dados serem completos, eles representam esforços continuados de sofisticação e completude. Desta forma, pode-se afirmar que alguns bancos de dados atuais, concentram-se em subsistemas tais como o visual e o motor, enquanto que outros são meta-bancos de dados dedicados à organização e catalogação de imagens funcionais.

O mais importante componente de um banco de dados de neuroimagens de múltiplos pacientes é a funcionalidade relacionada com a transformação espacial de um cérebro, a fim de torna-lo geometricamente comparável ao de outro paciente. As imagens armazenadas em um banco de dados podem ser equivamente comparadas a um atlas, onde se encontram espacialmente transformadas para um sistema de coordenadas em comum.

Entretanto, a variação anatômica impossibilita o uso de um simples esquema de banco de dados computacional a fim de criar um atlas padronizado. As estruturas cerebrais variam de indivíduo para indivíduo, em tamanho, em formato, e em orientabilidade de sua estrutura. Estas variações dificultam significativamente a comparação funcional e anatômica de dados provenientes de diferentes pacientes [126, 127]. Em geral, utiliza-se como sistemas de coordenadas normalizador o sistema de Talairach, descrito na seção 3.4.

Infelizmente, existem requisitos necessários a serem atingidos de modo a permitir a integração completa de bancos de dados computacionais para neuroimagens. As imagens por si só não indicam, como as ativações cerebrais foram estimuladas, e ainda, como as imagens foram adquiridas. Até o momento, não existe nenhum

padrão universalmente aceito descrevendo tais procedimentos.

Os dados de neuroimagens são bastante complexos. Neste sentido, codificá-los em um formato padrão representa um problema substancial. Entende-se como necessária uma indexação abrangente e flexível, e também uma descrição das variáveis experimentais. Claramente, deve-se estabelecer uma taxionomia padrão para equacionar, e diferenciar as várias características dos dados, principalmente no tocante aos paradigmas empregados em sua coleta.

Sistemas ontológicos, que especificam de forma única as palavras e os conceitos que elas representam, são essenciais para a construção destes bancos de dados padronizados, tal como são os dicionários de dados comumente utilizados na integração de SGBDs e de *Datawarehouses*. Este problema é extremamente acentuado no estudo da neuroanatomia funcional, na qual a identificação nominal de estruturas cerebrais específicas é ambígua, causando confusão e desconcordância na literatura específica. O Sistema Unificado de Linguagem Médica do *US National Library of Medicine* (UMLS - *Unified Medical Language System* [128]) inclui nomenclaturas anatômicas especificamente voltadas para estabelecer a taxonomia, e oferecer uma estrutura útil na construção de bancos de dados de neuroimagens. Contudo, observa-se o pouco uso ainda deste tipo tesouro.

Por fim, existe a questão relacionada com o controle de qualidade dos dados e experimentos inseridos no banco [112]. Para assegurar a viabilidade dos estudos científicos é essencial que seja possível documentar em sua totalidade os procedimentos usados, permitindo uma melhor análise de seus resultados.

Os bancos de dados de neuroimagens, através de sistemas globais de gerenciamento de dados, irão fornecer a capacidade de fusão de informação e produção de conhecimento em assuntos relacionados com o sistema nervoso. Contudo, este desenvolvimento ainda encontra-se em um estágio embrionário, e ainda não está operacional no sentido de integrar informações.

5.4 Modelos Computacionais

O poder computacional dos computadores modernos, por exemplo, é significativamente maior que o poder computacional do cérebro de um inseto. Entretanto, não existe nenhum modelo, ou sistema robótico, que seja capaz de simular o comportamento deste mesmo inseto. Naturalmente, os modelos são uma representação simplificada de uma realidade mais complexa, sendo que o importante é incorporar os elementos realmente significativos em sua descrição. Neste sentido, os modelos computacionais do cérebro tende a se restringir a problemas específicos, conforme será apresentado a seguir.

Observa-se na literatura diversas abordagens ao problema da modelagem funcionamento do cérebro. Sob a ótica do processo químico, existem trabalhos relacionados com neurotransmissores [129, 130]. A simulação do processo celular trata, entre outros assuntos, sobre o potencial de ação dos neurônios [131, 132]. O processo psicológico, por sua vez, é abordado por trabalhos envolvendo estudos sobre autismo [133], delírio e criatividade [134]. Em geral, estas pesquisas utilizam técnicas tais como redes neurais, e modelos de elementos finitos. Existem também vários trabalhos dedicados à modelagem do modelo cerebral de cognição. Neste sentido, os estudos mais proeminentes são o SOAR [135, 136, 137, 138, 139], o ACT-R [140, 141] e o EPIC [142, 143, 144, 145].

O modelo computacional chamado SOAR tem por objetivo prover um comportamento genérico inteligente para aplicações em computador. Ele permite que um sistema execute algumas tarefas cognitivas, em geral associadas à interação homem-máquina, ao processamento de linguagens, à aquisição de conhecimento, e à melhoria de eficiência em sistemas de produção. A arquitetura permite uma subdivisão da atividade principal em tarefas menores, aprende como realizar estas tarefas e realiza inferências sobre sua eficiência. Na literatura, uma crítica constante a este modelo é sua complexidade de programação.

O ACT-R é outro modelo computacional de cognição humana. Ele envolve um modelo de estruturas básicas de memória, mecanismos de aquisição de conhecimento, e processos de armazenamento/busca de informação. Ele é uma arquitetura

bastante empregada pois se trata de um modelo elaborado e cuja implementação é distribuída gratuitamente. Em geral, uma atividade qualquer é definida através de um povoamento da arquitetura ACT-R com o conhecimento necessário para sua execução. Podem ser encontrados trabalhos nas áreas de percepção visual, processamento de linguagens, mecanismos de atenção, e de tomada de decisão. Contudo, este modelo necessita que sejam realizadas assertivas explícitas para a solução de pequenas tarefas, o que exige um longo período de treinamento do sistema, típico de sistemas que aprendem a partir de instruções.

O sistema EPIC é capaz de executar uma variedade de tarefas cognitivas. Ele é baseado em uma enumeração de condições de contorno que buscam modelar o comportamento humano em tarefas específicas. Basicamente, deve-se definir as estratégias e as tarefas a serem executadas para então disparar a simulação. Paralelamente, deve-se realizar o mesmo teste com seres humanos para poder permitir a comparação entre os dados obtidos no teste real e na simulação. Uma vez que os testes comprovem o correto funcionamento do modelo do fenômeno o qual se deseja representar, pode-se realizar a validação das condições de contorno inseridas no EPIC. Uma característica interessante é a separação do modelo computacional do modelo teórico de cognição. Isto permite que diversos modelos teóricos possam ser testados na máquina de inferência do EPIC.

Conforme mencionado no Capítulo 1 durante a delimitação do problema proposto, o modelo computacional deste trabalho está focado no processo mecânico, espacial e temporal da ativação cerebral, e não no processo químico, celular, psicológico e cognitivo. É importante mencionar que, até o momento, não foram encontradas evidências de pesquisas relacionadas com a presente Tese.

Capítulo 6

Metodologia

Este capítulo tem por finalidade apresentar a metodologia empregada na determinação de um modelo computacional, capaz de interpretar o processo de ativação cerebral humano para um conjunto estímulos. Neste sentido, será realizada uma breve descrição metodologia, e em seguida, serão realizados comentários mais aprofundados sobre cada etapa implementada.

6.1 Descrição Geral

A metodologia a ser descrita pretende responder ao problema relacionado com a viabilidade em se criar um modelo computacional capaz de sistematizar e interpretar o processo de ativação cerebral humano. A hipótese inicial é que se o processo de ativação é passível de tratamento sistêmico, então pode ser construído um modelo computacional que o descreva. Desta forma, em havendo uma Máquina de Turing reconhecedora de padrões de ativação cerebral, existirá também um algoritmo capaz de desempenhar as mesmas funções de reconhecimento.

A resposta para estas questões cria uma função neural com características de otimização dos recursos neurológicos. A literatura científica sugere que é viável modelar a determinação das respostas por regras similares àquelas utilizadas em cálculos de otimização [146]. Existe um grupo de biólogos os quais argumentam que o cérebro é formado por partes especialistas, não necessariamente únicas para cada tarefa, dedicadas a solucionar determinados tipos de problemas [147]. No

entanto, o desempenho funcional destas partes especialistas não está relacionada com o seu tamanho, ou com sua densidade, tal como proposto pela corrente frenologista.

Entende-se que existem vantagens evolucionárias claras que suportam esta teoria. Durante sua existência, o ser humano é confrontado com um conjunto vasto, porém finito, de problemas. Resolver problemas específicos que lhes são apresentados, e ter circuitos neurais dedicados a estas tarefas, caracteriza uma otimização, aumentando a eficiência das estruturas neurológicas, comparada a uma proposta que sintetiza a existência de tecidos dedicados a atividades genéricas. Estes últimos seriam provavelmente mais custosos, e não tão bem adaptados ao limite funcional[148].

Durante a pesquisa desta Tese, tornou-se claro que existem divergências filosóficas com relação a abordagem a ser dada ao estudo do sistema nervoso humano. De um lado está a corrente neurocientista que busca modelar o cérebro de forma mecanicista, e do outro, a corrente psicanalista que se dedica ao comportamento não determinístico da mente. Conforme mencionado na Seção 3.6, entende-se que ambas as correntes buscam dar suas soluções para um mesmo problema, não cabendo a discussão sobre qual é a correta. Entretanto, de modo a ser fiel aos objetivos desta Tese, tem-se que a abordagem neurocientífica é mais adequada para sua consecução.

O uso da RMf no estudo da ativação cerebral também é controverso. A Seção 4.6 descreveu os problemas relacionados com a precisão do exame, principalmente quando o objeto de estudo é um único neurônio. Contudo, as primitivas lógicas que são empregadas na construção do Sistema Formal Reconhedor, estão associadas às áreas de Brodmann cuja escala cria um modelo macroscópico, aceito pela comunidade neurocientífica, e indiferente às imprecisões do exame de RMf.

Neste sentido, assumindo estas condições de contorno, a Figura 6.1 ilustra esquematicamente as etapas metodológicas propostas para a obtenção de um modelo computacional da dinâmica de ativação cerebral, mediante estímulos emocionais. Inicialmente, é realizada uma coleta de dados que consiste na reunião de: (1) um conjunto de imagens volumétricas; (2) um mapa de coordenadas de Talairach; e (3) um conjunto de áreas de Brodmann. Estes dados de interesse são aqueles nos quais

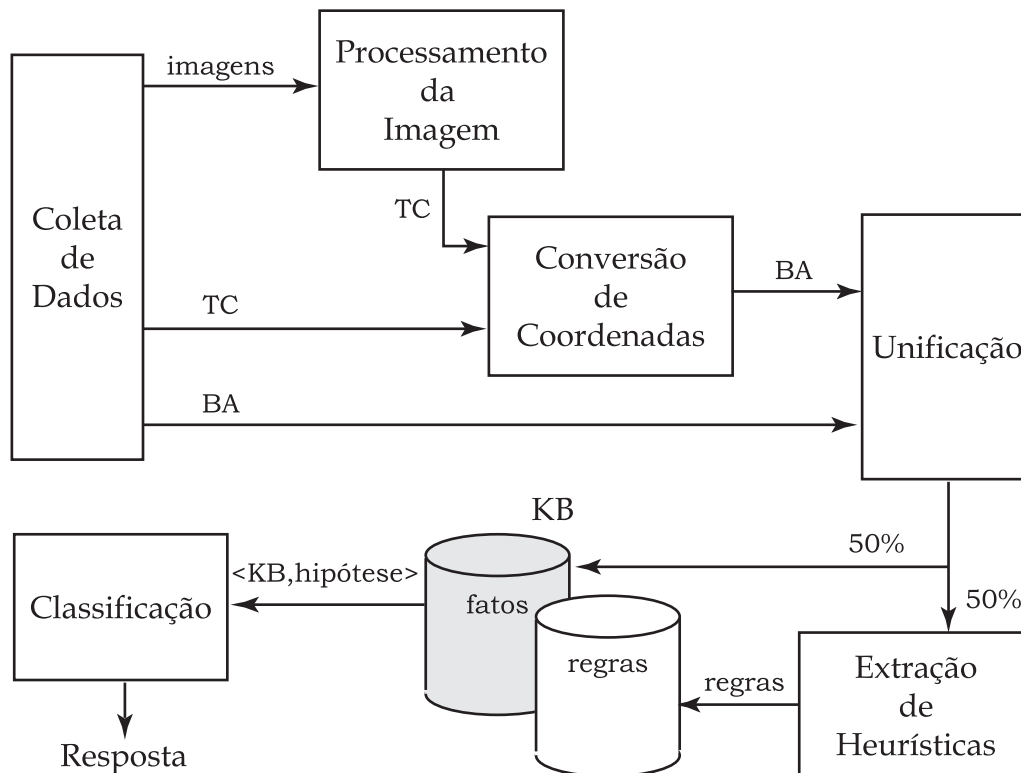


Figura 6.1: Diagrama de blocos da metodologia empregada no processamento das ativações cerebrais.

pôde ser comprovada cientificamente a existência de ativações cerebrais evocadas por estímulos emocionais, que serão melhor descritas na seção a seguir.

Em seguida, são executadas as fases de Processamento de Imagens e Conversão de Coordenadas, de acordo com o tipo de dado de entrada. Estas fases têm por objetivo identificar as áreas de Brodmann, ativadas por estímulos emocionais, que serão organizadas e consolidadas durante a etapa de Unificação.

Parte dos dados estruturados é utilizada na fase de Extração de Heurísticas, a fim de identificar regras de produção. Estas regras são representadas por Máquinas de Turing, e materializadas através da construção de um Sistema Formal Reconhecedor. A fase de Classificação, por sua vez, utiliza os dados estruturados que não foram usados durante a Extração de Heurísticas, de modo a garantir a idoneidade dos resultados. Desta forma, formula-se uma hipótese que, combinada com a base de

conhecimento, reconhece o valor emocional associado ao fenômeno descrito pelos dados.

6.2 Coleta de Dados

Os dados da ativação cerebral, oriundos de experimentações envolvendo estímulos emocionais, não são encontrados em abundância no meio científico. Isto ocorre porque os exames de RMf possuem um custo elevado, o que dificulta seu emprego em larga escala.

Além disto, sugere-se atentar para as características e as condições de contorno associadas ao método através do qual os dados da ativação cerebral são obtidos. Recomenda-se considerar apenas os experimentos nos quais houve uma preocupação com a autenticidade da resposta emocional. Neste sentido, deve-se atender as três condições para a existência da racionalidade, conforme preconizado por Binmore (veja Seção 2.2). Caso as respostas dos indivíduos submetidos aos testes não estejam condizentes com o resultado racional esperado, será possível afirmar que elas foram movidas exclusivamente por suas emoções.

Durante os experimentos de ativação cerebral, principalmente aqueles que evocam emoções, os indivíduos imageados pelos exames de RMf comportam-se como jogadores. Sob esta ótica, é importante criar condições para que o jogador comporte-se de forma racional, tal como descrito na Seção 2.2. Assim, se algum comportamento dito não racional emerge de uma determinada situação, pode-se dizer que ele o faz exclusivamente devido aos circuitos neurais emocionais do cérebro, e não devido a uma falta de colaboração com o experimento, ou mesmo, por uma dificuldade do indivíduo em compreender como agir durante a execução do mesmo.

Outro fator limitante é a questão da normalização. Uma vez que os dados são oriundos de pessoas distintas, tem-se como indispensável aplicar as transformações espaciais necessárias para efetuar o ajuste ao modelo padrão de cérebro utilizado neste trabalho. Neste sentido, foi adotado o modelo preconizado pelo Instituto Neurológico de Montreal (veja a Seção 3.3) devido ao espaço amostral utilizado na

construção do modelo, e à clareza com que os parâmetros do mesmo são disponibilizados. Assim, exige-se que os dados coletados se reportem a este modelo.

Neste cenário de material exíguo, é desejável viabilizar o acesso aos dados, de forma independente dos formatos nos quais eles são disponibilizados. Por este motivo, a metodologia prevê a aquisição de dados codificados em diversos formatos, tais como imagens volumétricas, coordenadas de Talairach (*TC*), áreas de Brodmann (*BA*) e a identificação nominal de estruturas cerebrais.

Nas situações representadas pelas imagens volumétricas, sugere-se identificar somente as áreas de Brodmann ativadas. Isto é realizado durante as fases de Processamento de Imagem e Conversão de Coordenadas, materializadas pelo cálculo do centro da ativação e pela localização da área associada, respectivamente.

Os dados codificados por coordenadas de Talairach, são submetidos somente a fase de Conversão de Coordenadas de modo a encontrar a região na qual o ponto de ativação se encontra inscrito. Já as estruturas cerebrais identificadas nominalmente podem ser facilmente codificadas segundo as áreas de Brodmann através de uma simples consulta ao Sistema Unificado de Linguagem Médica (veja a seção 5.3).

A escolha do uso das áreas de Brodmann se dá por motivos de precisão. Sabe-se que a codificação mais precisa é obtida através das coordenadas de Talairach, devido sua natureza pontual. Entretanto, as áreas de Brodmann, as ativações em imagens volumétricas, e as descrições nominais, são representadas por feições volumétricas. Dado que estas feições possuem um erro associado as mesmas, tem-se que uma possível transformação para uma feição pontual também agregaria um fator de incerteza. Por outro lado, o mapeamento de uma coordenada de Talairach sobre uma área de Brodmann é unívoco.

É importante observar que as imagens volumétricas e as já mencionadas descrições nominais podem ser mapeadas sobre as áreas de Brodmann, com eficiência de precisão. Estes volumes são compostos por diferentes arranjos celulares dos lobos corticais, tal como mencionado na Seção 3.4. Uma vez que as áreas de Brodmann foram concebidas justamente a partir de diferenças da citoarquitetura, tem-se que

os volumes podem ser representados por uma combinação destas áreas, sem que haja perda de informação. Já as feições pontuais das coordenadas de Talairach podem ser generalizadas por sua área de Brodmann correspondente, de acordo com sua posição no espaço.

Os dados utilizados neste trabalho foram acessados a partir do *site* do Laboratório de Neuroimageamento da Universidade da Califórnia (UCLA) [125], respeitando os direitos autorais previstos nos termos de condição de uso, vigentes em 24 de outubro de 2005. Devido aos critérios de escolha dos dados, citados anteriormente, obteve-se 17 imagens volumétricas, 38 conjuntos de coordenadas de Talairach, 15 conjuntos de áreas de Brodmann e 4 descrições nominais. Os dados em questão representam uma coleção de exames de RMf nos quais os indivíduos imageados são submetidos à estímulos emocionais.

Este espaço amostral abrange as ativações associadas ao medo, a alegria, a tristeza, a raiva e a repugnância. Neste sentido, o Sistema Formal Reconhecedor implementado é capaz de identificar somente estes estados emocionais.

6.3 Processamento da Imagem

A fase de Processamento da Imagem tem por objetivo determinar um centro matemático associado a uma ativação cerebral. Sob esta ótica, é importante observar que este procedimento agrega à metodologia um erro relacionado com a transformação de um volume em um ponto matemático de ativação cerebral. Entretanto, este erro tende a ser reduzido dado que ele será, em uma fase posteriormente descrita na Seção 6.4, localizado no interior de um volume de Brodmann.

Conforme apresentado na Seção 3.4, as funções cerebrais fazem uso de diversas áreas do cérebro, significando que a mesma função pode ser realizada por regiões corticais distintas. Desta forma, uma imagem volumétrica pode conter uma ou mais regiões de ativação simultaneamente. Assim, tem-se que uma mesma imagem volumétrica pode ser representada por diversas coordenadas de ativação.

A imagem volumétrica é segmentada de modo a separar os volumes ativados do restante da imagem. Para cada volume ativado define-se uma envoltória que o contenha, chamada de região de interesse (*Region of Interest* - ROI). De posse das regiões segmentadas, o centro matemático da ativação cerebral de cada ROI é calculado através de um *script*, descrito a seguir.

A empresa *Brain Innovation* [149] disponibiliza um *software* de avaliação chamado *Brain Voyager 2000* versão 4.8 que permite manipular imagens volumétricas provenientes de exames de RM. Este aplicativo é empregado em larga escala no uso clínico de imagens médicas para diagnósticos, e também é citado na literatura como uma ferramenta de apoio ao estudo de imagens de RMf. No contexto deste trabalho, este *software* foi empregado para realizar a leitura das imagens, sua segmentação, a extração das ROIs e a execução do *script* de cálculo do centro matemático. Este *script*, por sua vez, foi codificado em *VBScript*.

Observa-se ainda que não há uniformidade na intensidade da ativação de uma determinada área, ou seja, que existe um gradiente de ativação na região de interesse. Entende-se que as áreas de brilho mais intenso, isto é, as mais ativadas, devem contribuir de forma mais significativa do que aquelas de menor brilho. Assim, tem-se que o cálculo do centro de ativação \overline{P}_c é dado pela equação 6.1.

$$\overline{P}_c = \frac{\sum_i a_i P_i}{\sum_i a_i} \quad (6.1)$$

A equação 6.1 captura a idéia de contribuição relativa, entre cada fragmento da região ativada, através de uma média da posição dos voxels P_i da imagem ponderada pelo valor de intensidade a_i dos voxels da região, o que caracteriza uma analogia direta ao conceito de centro de massa empregado na Mecânica. O sistema de coordenadas sobre o qual é realizado este cálculo corresponde ao Sistema de Talairach.

6.4 Conversão de Coordenadas

O objetivo da fase de Conversão de Coordenadas é identificar a área de Brodmann que envolve um ponto qualquer, descrito segundo as coordenadas de Talairach. Neste

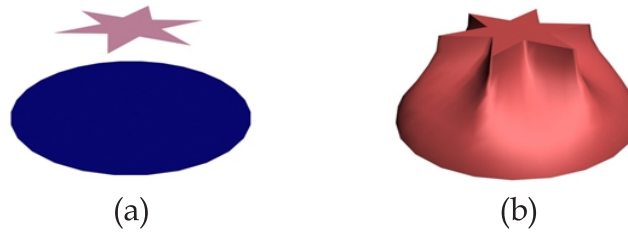


Figura 6.2: Processo de extrusão: (a) objetos iniciais que determinam as extremidades do objeto 3D desejado; (b) objeto 3D resultante da extrusão.

sentido, é necessário criar um modelo tridimensional de cada área de Brodmann, chamados volumes de Brodmann, para então verificar se a coordenada de Talairach encontra-se imersa em um destes volumes. Este modelo é definido a partir das imagens planares de áreas neurológicas, modelando-se os volumes correspondentes às áreas de Brodmann a partir da especificação de sua superfície (casca).

O volume de Brodmann é um modelo tridimensional criado usando um procedimento de extrusão, ilustrado na Figura 6.2, e detalhado a seguir. Inicialmente, tomam-se dois objetos planares que definem a forma desejada das extremidades inicial e final do objeto tridimensional. No exemplo ilustrativo da Figura 6.2a, os objetos inicial e final são dados por uma circunferência e uma estrela respectivamente. A operação de extrusão interpola uma superfície, obtendo-se o resultado mostrado na Figura 6.2b. No Capítulo 7 serão apresentados os resultados obtidos através da extrusão das áreas de Brodmann.

De posse dos volumes de Brodmann é possível identificar a região que envolve um ponto qualquer, descrito segundo as coordenadas de Talairach. O algoritmo empregado é uma adaptação das rotinas de detecção de colisão, comumente utilizados em Computação Gráfica [150, 151].

Durante procedimentos de detecção de colisão, busca-se especificar a posição relativa de um determinado ponto (a posição da câmera) em relação à superfície com a qual ele irá colidir (o objeto). Neste sentido, realiza-se uma adaptação deste algoritmo para que seja possível localizar qual o volume que contém o ponto. Uma vez

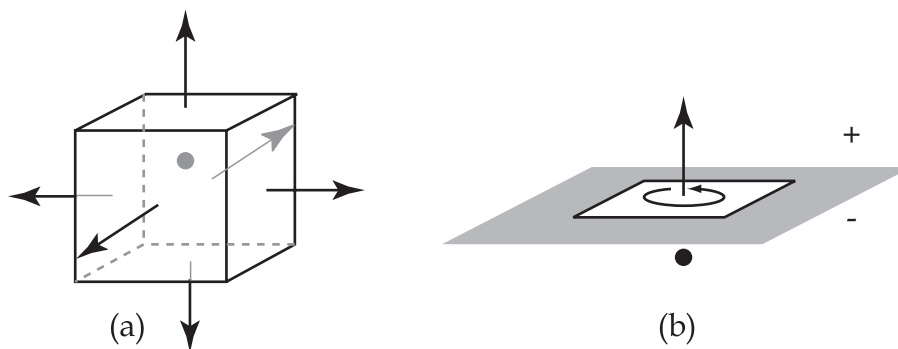


Figura 6.3: Determinação da posição relativa de um ponto segundo um dado volume.

que o volume está associado a um volume de Brodmann, tem-se que este procedimento permite o mapeamento desejado.

Sob esta ótica, o critério para que um ponto esteja no interior de um volume é que o mesmo esteja contido no semi-espaço negativo de todas as faces que definem a casca deste volume. Estas faces são orientadas de forma que seus vetores normais apontem para fora do volume. A Figura 6.3a apresenta um cubo e um ponto no interior do mesmo. A Figura 6.3b ilustra a face de topo do cubo, sua orientabilidade, seu plano associado e o ponto em questão. Neste caso, pode-se observar com mais facilidade que o ponto está contido no semi-espaço negativo do plano, segundo a orientabilidade proposta.

Uma questão importante está relacionada com a geometria do cérebro. Em princípio, pode-se assumir uma simetria cerebral, pois o corpo humano tem duas metades quase simétricas. Entretanto, na espécie humana, assim como as não humanas, as funções corticais parecem estar assimetricamente repartidas pelos hemisférios cerebrais.

A razão para essa assimetria funcional provavelmente está relacionada com a necessidade da existência de um controlador único quando do momento da tomada de decisão sobre uma ação. Se ambos os hemisférios cerebrais tivessem a mesma importância na elaboração de uma ação, seria gerado um conflito decisório devido a

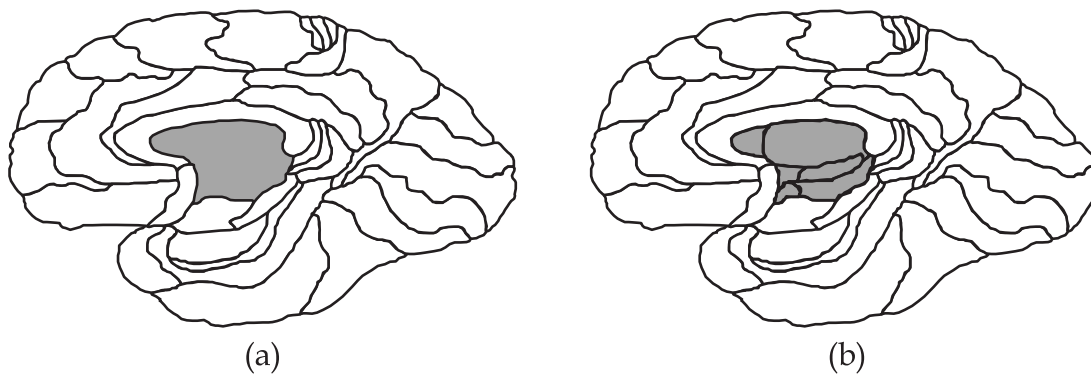


Figura 6.4: Região não mapeada por Brodmann: (a) zona de vazio; (b) novos limites definidos segundo as subdivisões do sistema límbico.

uma possível dualidade da responsabilidade funcional de ativação. Para a maioria das funções neurológicas, as estruturas de um dado hemisfério têm precedência sobre o outro. Por este motivo, as áreas de Brodmann de cada hemisfério do cérebro, descritas nesta Tese, são tratadas como áreas distintas para efeito de registro da ativação cerebral, e possuem modelos tridimensionais também distintos.

Outro aspecto a ser ressaltado está relacionado com o subcórtex cerebral, que não possui mapeamento segundo áreas de Brodmann. Esta é uma região localizada no interior do cérebro, e pode ser visualizada através da região em evidência da Figura 6.4a. Uma vez que não se deseja obter zonas de vazio no modelo tridimensional, torna-se necessário definir áreas que mapeiem esta região conhecida como Sistema Límbico. Por tanto, foram definidos os limites segundo a subdivisão clássica do Sistema Límbico, apresentada na Figura 6.4b.

Estas regiões do Sistema Límbico foram numeradas, tal como as áreas de Brodmann. Assim, atribuiu-se a amígdala o código 60, ao hipocampo o código 61, ao tálamo o código 62, ao hipotálamo o código 63. Por fim, o córtex entorrinal e o piriforme foram numerados com 64 e 65, respectivamente.

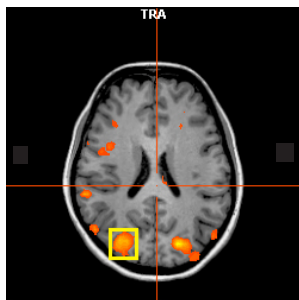


Figura 6.5: Exemplo de ativação cerebral que materializa um possível estado de uma Máquina de Turing.

6.5 Unificação

A fase da Unificação corresponde a etapa de conformação dos dados, cujo objetivo é preparar as informações provenientes da funcionalidade de importação de dados, a fim de que as mesmas sejam representadas por fatos lógicos, em conformidade com uma base de conhecimento. Cada fato lógico será indexado por um símbolo terminal de um alfabeto Σ , com vistas a construção de uma Máquina de Turing, a ser descrita na Seção 6.6.

Um determinado instante de ativação cerebral é associado a um estado de um Sistema Formal. Supondo que a Figura 6.5 capture um destes instantes, tem-se que existem 10 áreas de ativação, tal como é descrito na Tabela 6.1. Realizando a extração das ROIs, e localizando-se os respectivos volumes de Brodmann, tem-se que as áreas ativadas são: 19E,19D,39E,39D,44E,48E,48D. Neste sentido, esta configuração representa um estado da Máquina de Turing, por exemplo, chamado q_1 . Este estado é materializado através de um fato lógico do tipo *estado*(q_1).

Parte destes fatos formam um espaço amostral, cuja função é alimentar a fase de Extração de Heurísticas. Paralelamente, é construído um conjunto de teste a partir dos fatos restantes, sendo inserido em uma segunda base de conhecimento, de forma a permitir a validação das regras produzidas pela etapa de Extração de Heurísticas.

ESTÁGIO DE ATIVAÇÃO					
<i>ROI</i>	<i>TC</i>	<i>BA</i>	<i>ROI</i>	<i>TC</i>	<i>BA</i>
1	-39,-81,23	19E	6	-40,26,22	48E
2	-47,-65,25	39E	7	40,20,25	48D
3	-58,-32,21	48E	8	49,-72,20	39D
4	-46,-4,23	44E	9	-27,-83,23	19D
5	-43,3,23	48E	10	35,-87,21	19D

Tabela 6.1: Um estágio de ativação com seus respectivos centros matemáticos.

6.6 Extração de Heurísticas

A extração de Heurísticas corresponde à busca da identificação de regras de produção que descrevam os diferentes relacionamentos entre os volumes de ativação, durante o processo dinâmico de atividade cerebral. Os dados nos quais é realizada esta procura, são aqueles contidos no espaço amostral de fatos lógicos, fornecido pela fase anterior.

A ferramenta empregada nesta Tese é uma Máquina de Turing, representada por autômato finito. O uso de Máquinas de Turing é particularmente interessante, pois elas são universalmente conhecidas e aceitas como a formalização de um algoritmo. Além disto, a Máquina de Turing possui no mínimo o mesmo poder computacional de qualquer dispositivo computacional, permitindo abstrair qualquer dependência tecnológica da atualidade. Identificar uma máquina como esta, dentro do espaço amostral, significa apontar para a possibilidade de tratamento sistêmico do problema, ou seja, a viabilidade da construção de um modelo computacional resolvidor do problema proposto.

A Máquina de Turing é caracterizada por uma quintupla $M = \langle K, \Sigma, \delta, s, F \rangle$. O valor K representa o conjunto finito de estados possíveis que o modelo cerebral poderá assumir. Assim, neste conjunto estão os estados representativos de sentimentos emocionais contemplados neste trabalho, bem como seus estados transitórios. O alfabeto Σ contém os símbolos terminais e não terminais utilizados na construção da máquina. Portanto, este conjunto, também finito, contém os sinais gráficos associa-

dos aos volumes de ativação. O valor s é um elemento do conjunto K , isto é, $s \in K$, e representa o estado inicial da máquina. O conjunto F , por sua vez, é o conjunto de estados de parada, que também está contido em K , isto é, $F \subseteq K$. Por tanto, F corresponde aos estados que estão diretamente relacionados com o reconhecimento de uma determinada emoção. Por fim, δ é o conjunto das funções de transição que permite capturar o dinamismo da ativação cerebral.

A literatura [152, 153, 154] sugere que os elementos do alfabeto Σ devam ser escolhidos de forma que sejam facilmente reproduzidos e que seja impossibilitada sua decomposição. Assim, símbolos do tipo $||$ devem ser evitados pois poderiam ser confundidos pela concatenação de dois símbolos $|$. Entretanto, no contexto desta metodologia podem existir até 130 volumes de ativação para serem identificados por sinais gráficos, o que dificulta de sobremaneira a tarefa de escolha dos símbolos.

Sob esta ótica, sugere-se o uso de três entradas alfa-numéricas para a representação de um volume de ativação. Os dois primeiros dígitos são preenchidos com a mesma numeração dos volumes de Brodmann, no caso em que o objeto a ser representado é uma área de Brodmann. No caso em que o objeto pertence ao Sistema Límbico, são utilizados os códigos identificadores apresentados na Seção 6.4. O último dígito, para ambas situações, representa o hemisfério cerebral correspondente, isto é, o esquerdo ou o direito. Desta forma, por exemplo, o volume de Brodmann BA23 do hemisfério direito será representado pelo símbolo $23D$, enquanto que a amígdala esquerda será associada ao símbolo $60E$. A desativação da amígdala esquerda, por sua vez, será dada por $\overline{60E}$

Uma vez especificados os parâmetros da Máquina de Turing, são criadas as regras de produção que descrevem o comportamento desejado. As regras são então inseridas na base de conhecimento que será utilizada durante a etapa de Classificação.

6.7 Classificação

A etapa de Classificação é uma fase operacional destinada a identificar o valor emocional associado ao fenômeno descrito pela Máquina de Turing. Este processo

de identificação consiste em realizar a derivação de uma hipótese (ex: "O sentimento descrito pelos dados é de medo"), a partir dos fatos e das regras presentes em uma Base de Conhecimento.

Neste sentido, será utilizado o Witty Acadêmico [155], um *software* já existente dedicado ao processamento de conhecimento e a provas automáticas de teoremas. Este programa foi desenvolvido pelo Grupo Witty, sendo que o autor desta Tese pertence ao mesmo. O Witty implementa uma máquina de inferências lógicas, baseada no algoritmo de resolução linear com oráculos e filtros. Ele permite: (1) a seleção de predicados de uma base de conhecimento; (2) a unificação de predicados; (3) a aplicação de filtros; (4) a realização de *backtracking*; (5) a aplicação de oráculos, e; (6) a construção de respostas.

Assim, a derivação de uma determinada hipótese será realizada através da máquina de inferência do Witty. O resultado final, caso a proposição possa ser provada pelo oráculo, será o reconhecimento do valor emocional associado à ativação cerebral descrita pelas áreas de Brodmann.

Capítulo 7

Resultados

Este capítulo tem por finalidade apresentar e analisar os resultados obtidos durante a execução da metodologia descrita no Capítulo 6. Neste sentido, são apresentadas características resultantes da preparação dos dados, os estudos estatísticos e os resultados obtidos através da aplicação da metodologia implementada.

7.1 Preparação dos Dados

O processo de cálculo do centro matemático do volume cerebral ativado foi facilitado pelo uso da ferramenta Brain Voyager 4.8 [149], principalmente no que tange à leitura e à segmentação das imagens. A Figura 7.1a apresenta um corte de uma imagem volumétrica que serve de base para o processamento de imagens, enquanto que na Figura 7.1b são apresentadas as áreas de ativação segmentadas a partir dos dados de RMf. Estas áreas ativadas são apresentadas em pseudo-cor.

Através da Figura 7.1b pode-se observar diversas áreas do cérebro sendo ativadas simultaneamente. Para cada uma destas áreas foi definida uma ROI, sobre a qual foram feitos os cálculos do centro matemático de ativação descrito na Seção 6.3. O processo de delimitação da ROI é manual e meticuloso de modo a garantir que uma ROI não contenha duas ou mais regiões de ativação morfologicamente desconexas.

A Figura 7.2 demonstra uma das áreas de ativação delimitada por sua respectiva ROI, sendo sua demarcação facilitada pela segmentação da imagem. A imagem volumétrica apresentada pertence ao conjunto de amostras que acompanham a ins-

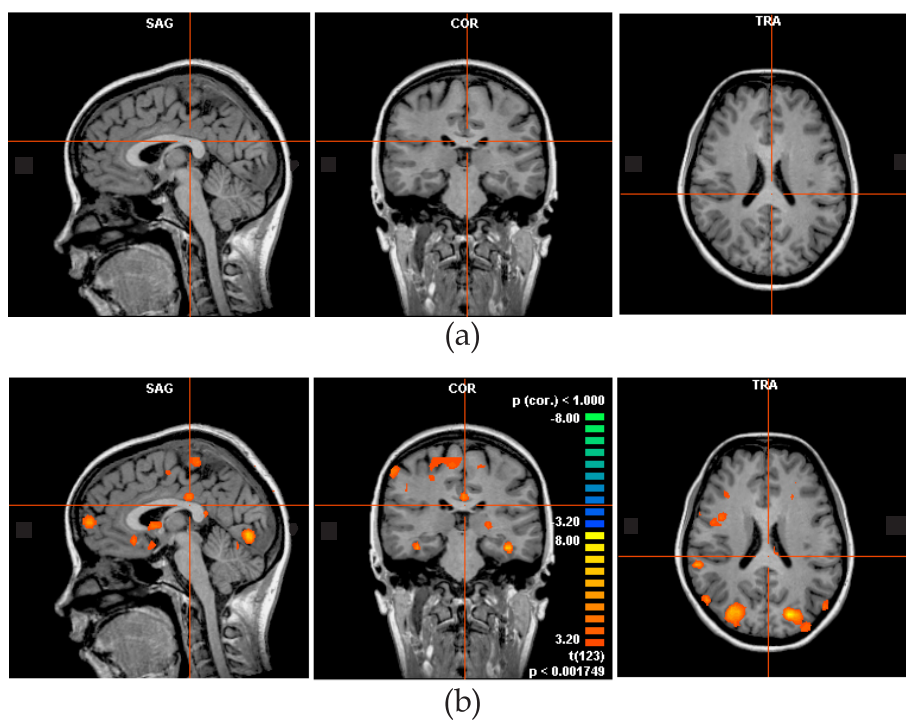


Figura 7.1: Imagens volumétricas: (a) imagem base do cérebro de um indivíduo; (b) áreas cerebrais ativadas.

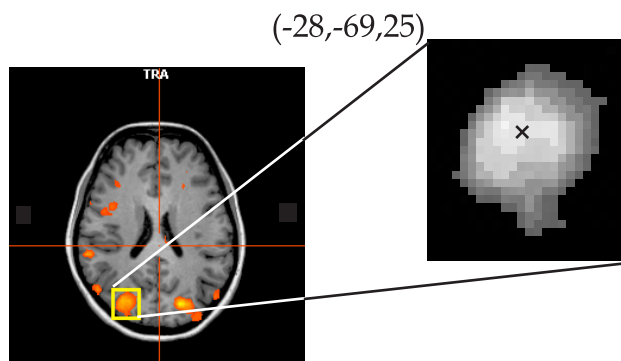


Figura 7.2: Figura de ativação de uma região cerebral ilustrando a delimitação de uma ROI e o cálculo do centro matemático de ativação.

talação do Brain Voyager 4.8, e por este motivo não se trata necessariamente de uma ativação resultante de um estímulo emocional. De fato, trata-se apenas de uma figura meramente ilustrativa. No detalhe da mesma, observa-se a área ativada extraída da imagem segmentada com suas cores em níveis de cinza. Esta ROI é uma imagem de 25×27 pixels, sendo que seu centro matemático está localizado no ponto $(-39.774, -80, 581, 23.847)$, sendo que sua extremidade superior esquerda encontra-se na posição $(-28, -69, 25)$ do sistema de coordenadas de Talairach. Este ponto irá ser manipulado pela fase de conversão de coordenadas de modo a definir seu volume de Brodmann correspondente. Neste caso específico, este volume corresponde a BA19 esquerda.

De modo a permitir a conversão das coordenadas de Talairach foram construídos os volumes de Brodmann já descritos na Seção 6.4. A Figura 7.3 ilustra uma extrusão da BA06. No item (a), são apresentados dois objetos planares que representam os contornos internos e externos digitalizados a partir da Figura 3.4. Estes objetos compõem as formas inicial e final do volume desejado. A Figura 7.3b representa o volume BA06, e a Figura 7.3c indica sua posição relativa no cérebro.

Conforme mencionado na Seção 6.4, são necessários dois objetos planares a fim de executar a extrusão. No caso proposto nesta Tese, estes objetos são os perfis das áreas de Brodmann localizados nos planos interno e externo do cérebro. Estes

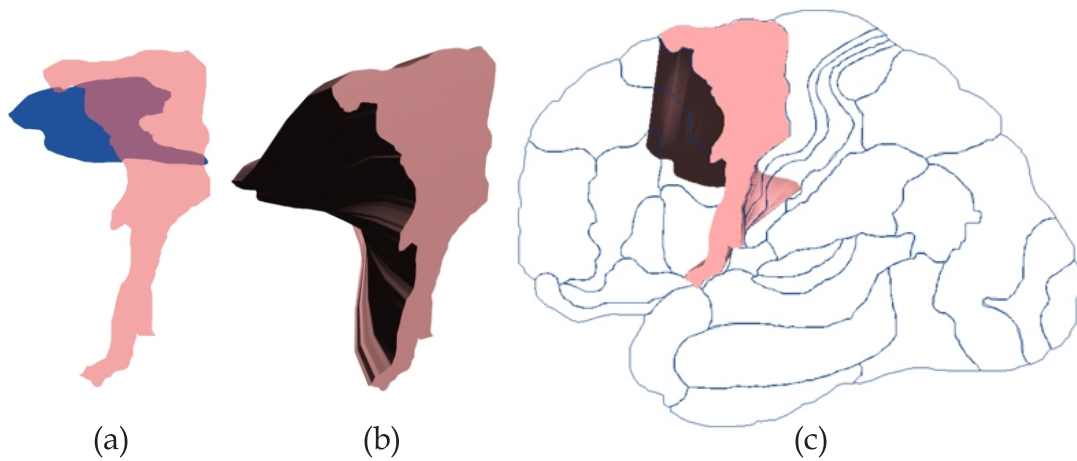


Figura 7.3: Processo de extrusão: (a) objetos iniciais que determinam as extremidades do objeto 3D desejado; (b) objeto 3D resultante da extrusão; (c) representação do encaixe do objeto 3D na imagem planar de regiões de ativação.

planos são identificados pelos números 1 e 3 da Figura 7.4.

Contudo, de modo a conferir um grau mais elevado de representatividade, foi adicionado um plano intermediário a fim de melhor balizar a interpolação durante o processo de extrusão. Através deste artifício, foi possível representar as áreas de Broadmann e o Sistema Límbico, cujos limites se encerra no interior do cérebro. Este plano intermediário é representado pelo plano 2 da Figura 7.4.

7.2 Características do Conjunto de Dados

De modo a construir o Sistema Formal Reconhecedor, foram realizados alguns estudos sobre os dados compilados a fim de melhor compreender seus relacionamentos. O entendimento da massa de dados composta pelos volumes de ativação contribuiu significativamente na montagem do autômato finito determinístico.

Sob está ótica, foram consolidadas na Tabela 7.1 algumas características dos dados obtidos na fase de "Coleta de Dados", contabilizando o número de ativações distintas ao longo do tempo. Nas colunas desta tabela estão relacionados os tipos de emoções evocados pelos experimentos, cujo critério de escolha foi mencionado na Seção 6.2.

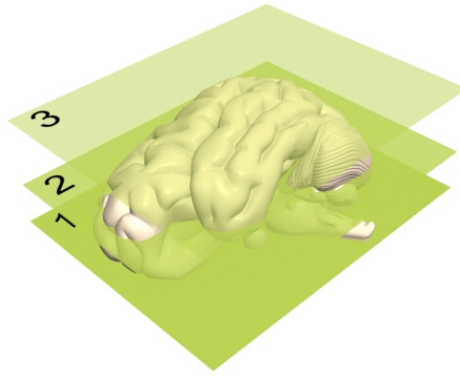


Figura 7.4: Cortes referentes as imagens planares utilizadas no processo de extrusão.

Através das características, dispostas sobre as linhas da tabela, procurou-se perceber o comportamento da ativação produzida por cada sentimento no cérebro.

CARACTERÍSTICA	EMOÇÃO					
	Repugnância	Raiva	Tristeza	Alegria	Medo	Total
<i>Total de Exames</i>	9	5	14	14	32	74
<i>Hemisfério Esquerdo, Brodmann</i>	3	2	9	8	16	38
<i>Hemisfério Esquerdo, Límbico</i>	2	0	3	3	3	11
<i>Hemisfério Direito, Brodmann</i>	6	2	8	8	17	41
<i>Hemisfério Direito, Límbico</i>	3	0	2	1	3	9
Total	14	4	22	20	39	

Tabela 7.1: Consolidação dos dados de RMf utilizados na elaboração do Sistema Formal Reconhecedor.

Considerando a característica "Total de Exames", observa-se uma dominância de trabalhos relacionados com o estudo da ativação cerebral mediante estímulos que evocam o sentimento de medo. Esta propriedade pode ser mais bem visualizada através da Figura 7.5a. Uma possível explicação para este fato é que o medo pode ser facilmente evocado em um experimento (veja Seção 5.2), e por esse motivo, existem mais estudos deste tipo de emoção. Ilustrativamente, considere um indivíduo ao qual são apresentadas imagens de paisagens harmoniosas, com coloridos agradáveis.

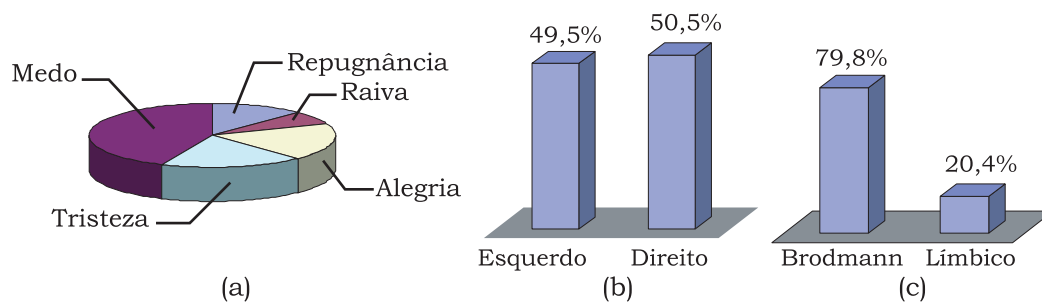


Figura 7.5: Valores estatísticos dos dados de RMf: (a) Quantitativo de dados associados ao conjunto de emoções selecionado; (b) Total de ativações por hemisfério cerebral; (c) Total de ativações nos volumes de Brodmann e no Sistema Límbico.

Para evocar a emoção de medo este indivíduo, basta lhe apresentar durante esta seção de imagens, uma imagem de um animal feroz prestes a atacar.

Outra característica interessante esta relacionada com a predominância do hemisfério direito sobre o esquerdo durante a dinâmica de ativação cerebral. Na Seção 3.5 foi descrito que o hemisfério direito é a porção cerebral predominantemente reguladora das ativações referentes às emoções. Apesar da Figura 7.5b sugerir uma diferença marginal na quantificação das ativações entre os hemisférios direito e esquerdo, observa-se que, em geral, o processo de ativação se inicia no hemisfério direito. Além disto, foi possível observar que as ativações neste hemisfério são mais intensas que aquelas observadas no hemisfério esquerdo.

Por fim, existe a relação da atividade cerebral com os locais definidos por ambos os volumes de Brodmann e do Sistema Límbico. A Figura 7.5c apresenta em valores percentuais uma simples contagem dos focos de ativação, indicando que os volumes de Brodmann são mais ativos que o Sistema Límbico. Sob uma primeira análise, esta conclusão parece contradizer o que foi relatado na Seção 3.5. Este suposto antagonismo ocorre porque o conteúdo cerebral descrito pelos volumes de Brodmann é significativamente maior do que aquele envolvido pelo Sistema Límbico. Por este motivo, sugere-se a necessidade de se realizar uma medição baseada em um fator relativo de ativação, ou seja, a relação direta entre o volume das regiões ativadas com

o real volume da massa cerebral correspondente (Broadmann ou Sistema Límbico).

Desta forma, realizando uma medição dos respectivos volumes das massas cerebrais através do modelo tridimensional do cérebro, obtém-se os valores de $V_{Broadmann} = 1.679.203 \text{ mm}^3$ e $V_{Limbico} = 223.191 \text{ mm}^3$. O cálculo do fator relativo de ativação, por sua vez, é descrito pela equação 7.1, na qual são considerados o volume das regiões ativadas e da massa cerebral. Através destes valores, observa-se que o Sistema Límbico é quase duas vezes mais ativo que o restante do cérebro, no caso específico das emoções.

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{\text{Volume das Ativacoes}}{\text{Volume Massa Cerebral}} & (7.1) \\
 f_{Broadmann} &= \frac{197.250}{1.679.203} = 0,1175 \\
 f_{Limbico} &= \frac{42.913}{223.191} = 0,1923
 \end{aligned}$$

7.3 Construção do Sistema Formal Reconhecedor

De modo a viabilizar a construção do Sistema Formal Reconhecedor foi necessário identificar os estados de ativação cerebral, tal como descrito na Seção 6.5. Sob esta ótica, foram construídas no Apêndice desta Tese as Tabelas A.1,A.2,A.3,A.4,A.5 que representam os estados de ativação q_n relacionados com o conjunto K do Sistema Formal. Os estados evidenciados por um sinal de * representam estados finais, isto é, elementos do conjunto F , $F \subseteq K$.

Tomando por base a Tabela A.1, pode-se observar que após a 1^a Amostragem contendo apenas o estado $\langle 10D \rangle$, ou simplesmente de q_1 , segue-se a 2^a Amostragem com dois possíveis estados: $q_2 = \langle 10D, 11E \rangle$, e $q_3 = \langle 11E \rangle$. Assim, para que ocorra a transição $q_1 \mapsto q_2$ é preciso que ocorra a ativação da área $11E$ durante a Amostragem 1. Desta forma, é gerada a regra dada pela equação 7.2, que irá compor o conjunto o conjunto de funções de transição δ da Máquina de Turing. Analogamente, a Equação 7.3 representa a função de transição $q_1 \mapsto q_3$, onde ocorre a desativação da região $10D$ e a ativação da região $11E$.

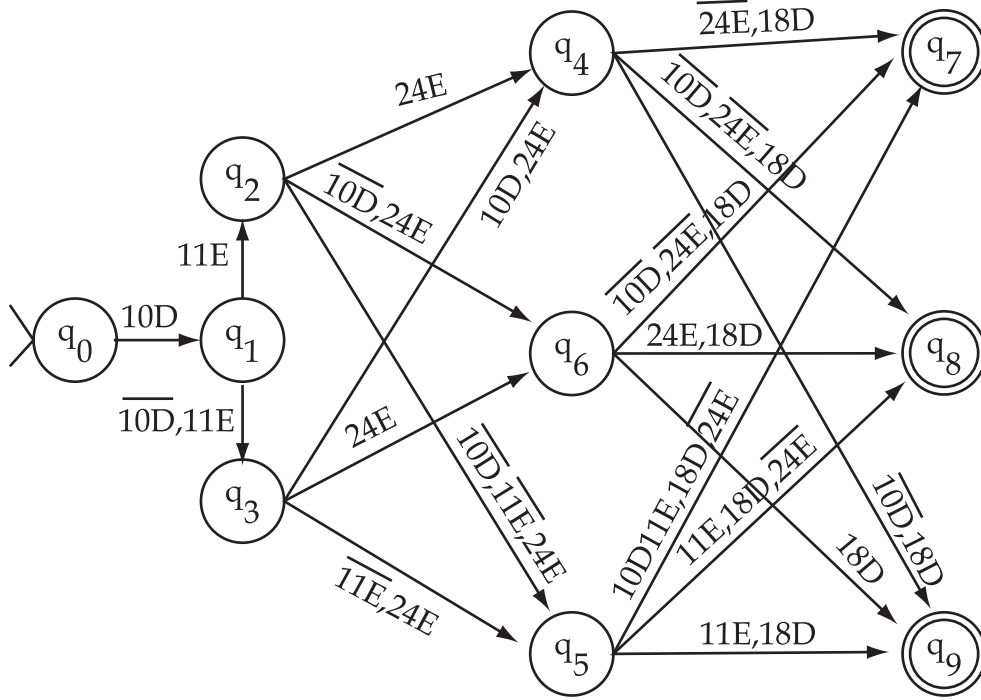


Figura 7.6: Autômato finito ilustrando as transições de estado de um sistema reconhecedor da emoção associada a raiva.

$$if\ estado(q_1)\ and\ ativacao(2, 11e)\ then\ estado(q_2) \quad (7.2)$$

$$if\ estado(q_1)\ and\ not\ ativacao(2, 10d)\ and\ ativacao(2, 11e)\ then\ estado(q_3) \quad (7.3)$$

De modo ilustrativo, pode-se representar os dados associados ao autômato finito reconhecedor do padrão de ativação para a raiva, descrito na Tabela A.1, através de um diagrama de estados finito (ver Figura 7.6). O estado q_0 representa o ponto de entrada no autômato, isto é, o estado inicial. Os estados q_7, q_8, q_9 representam estados finais associados à identificação de uma característica de raiva no processo de ativação. Nesta modelagem, optou-se por criar todas as transições de uma amostragem $_n$ para um amostragem $_{n+1}$.

A representação dos autômatos finitos através de diagramas de estados é uma forma didática de se estudar o funcionamento do autômato. Entretanto, com o incremento do número de estados de transição, este diagrama tende a ser tornar

denso demais, o que compromete seu entendimento.

Ilustrativamente, a base de conhecimento associada à repugnância possui 15 estados e 41 regras de transição. A base associada à alegria possui 26 estados e 111 regras de transição. As bases relacionadas com tristeza e medo possuem 26 estados e 97 regras, e 34 estados e 149 regras respectivamente. Em uma primeira análise, pode-se observar que os sentimentos emocionais com diferentes graduações de intensidade apresentam uma tendência a possuírem um maior número de regras e estados. Entretanto, devido ao volume de dados trabalhados ser limitado, tem-se que o presente trabalho não se propõe a uma confirmação estatística desta percepção.

7.4 Análise dos Resultados

Os dados estruturados pela fase de Unificação foram divididos em um Espaço Amostral e um Conjunto de Teste, tal como ilustrado na Tabela 7.2. O Espaço Amostral representa o conjunto de exames utilizados na tarefa de extração de heurísticas, isto é, na criação das regras de produção. O Conjunto de Teste está relacionado com os dados dos exames sobre os quais foram aplicadas as regras de produção a fim de realizar sua validação.

EMOÇÃO	NÚMERO DE EXAMES		
	<i>Espaço Amostral</i>	<i>Conjunto de Teste</i>	<i>Total</i>
Raiva	3	2	5
Repugnância	5	4	9
Tristeza	7	7	14
Alegria	7	7	14
Medo	15	17	32

Tabela 7.2: Divisão dos dados estruturados pela fase de Unificação.

O critério de divisão dos exames foi separar conjuntos com quantidades iguais de dados no Espaço Amostral e no Conjunto de Teste. No caso específico dos exames associados à raiva e à repugnância, cuja quantidade total não permitia uma divisão

exata, optou-se por privilegiar o Espaço Amostral. Esta decisão teve por base a intenção de prover, com um maior número possível de dados, a fase de Extração de Heurísticas. Neste sentido, buscou-se criar condições mais favoráveis para a elaboração das regras de produção.

Através da etapa de Classificação, procurou-se identificar o valor emocional associado ao fenômeno descrito pela Máquina de Turing. Este processo de identificação consistiu em realizar a derivação de uma hipótese (ex: "O sentimento descrito pelos dados é de medo"), a partir dos fatos e das regras presentes em uma Base de Conhecimento. Conforme mencionado na Seção 6.7, foi utilizado o Witty Acadêmico, um *software* já existente dedicado ao processamento de conhecimento e à provas automáticas de teoremas. Neste sentido, a derivação de uma determinada hipótese foi realizada através da máquina de inferência do Witty.

Sob esta ótica, entre os 37 exames testados apenas 2 não puderam ser deduzidos pela máquina de inferência, o que representa 94,59% de sucesso no reconhecimento da emoção retratada pelos dados. Como exemplificação, será apresentado um estudo de caso para um dos exames que foi reconhecido pelo sistema formal. Em seguida, será realizada uma abordagem mais detalhada sobre os dois casos onde o sistema formal apresentou falhas de reconhecimento.

Como exemplificação do primeiro estudo de caso efetivamente reconhecido, foi selecionado um exame que apresenta um conjunto de características interessantes a serem exploradas nesta etapa da formalização da Tese. Este exame corresponde às regiões cerebrais ativadas mediante um estímulo de medo. A Figura 7.7 apresenta cortes amostrais das imagens volumétricas do exame em questão.

1^a Amostragem: 09E 09D 32D 60D 61D

2^a Amostragem: 09E 13E 19E 60D

3^a Amostragem: 19E 19D 36D 60E 60D

4^a Amostragem: 19E 19D 30D 60D 62E

5^a Amostragem: 10D 19E 19D 24D

6^a Amostragem: 10D 19D 60D

7^a Amostragem: 10D 19D 37E 60D

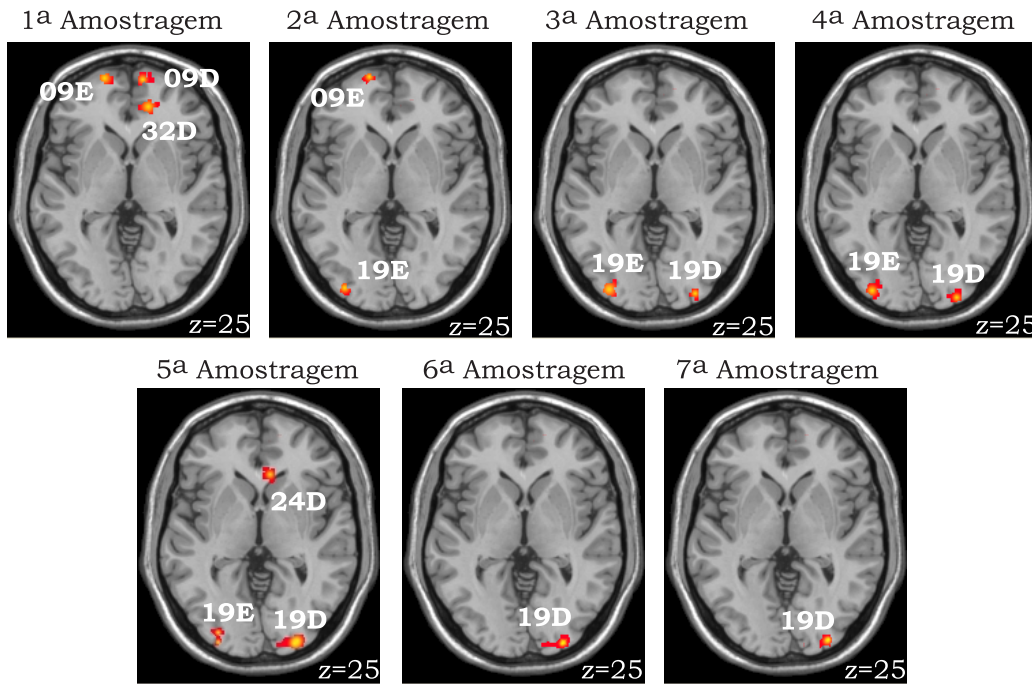


Figura 7.7: Cortes amostrais de uma imagem volumétrica representativa da ativação cerebral mediante um estímulo de medo.

Inicialmente, a Máquina de Turing está no estado inicial q_0 , recebendo as entradas $09E\ 09D\ 32D\ 60D\ 61D$, referentes à primeira amostragem. A máquina consulta seu conjunto das funções de transição δ e conclui que as entradas $09E\ 09D\ 32D\ 60D$ são suficientes para caracterizar uma alteração de estado, saindo de q_0 para q_{75} (veja Tabela A.5). Assim, diz-se que o estado q_{75} pode ser computado em um passo a partir do estado q_0 e das entradas $09E\ 09D\ 32D\ 60D$, ou simplesmente diz-se que $\delta(q_0, 09E\ 09D\ 32D\ 60D) \vdash_M q_{75}$. A dedução completa do reconhecimento é dada pela equação 7.4, que ilustra a possibilidade de computar o estado final q_{106} a partir da base de conhecimento.

$$\begin{aligned}
\delta(q_0, 09E 09D 32D 60D) &\vdash_M q_{75} & (7.4) \\
\delta(q_{75}, 09E 13E 19E 60D) &\vdash_M q_{80} \\
\delta(q_{80}, 19E 19D 36D 60E 60D) &\vdash_M q_{89} \\
\delta(q_{89}, 19E 19D 30D 60D 62E) &\vdash_M q_{94} \\
\delta(q_{94}, 10D 19E 19D 24D) &\vdash_M q_{98} \\
\delta(q_{98}, 10D 19D 60D) &\vdash_M q_{103} \\
\delta(q_{103}, 10D 19D 37E) &\vdash_M q_{106}
\end{aligned}$$

Nesta dedução é importante observar que quando a Máquina de Turing encontra-se no estado q_0 , e recebe as entradas $09E 09D 32D 60D 61D$, ela não necessita da entrada $61D$ para efetuar a transição ao estado q_{75} . Isto ocorre porque, a ativação da região $61D$ não é uma característica importante neste contexto. Neste sentido, ganha-se flexibilidade para tratar imagens volumétricas que contenham ativações além daquelas esperadas como resultante de um estímulo qualquer, como por exemplo nesta situação de medo. Esta mesma propriedade também pode ser observada na última linha da dedução (equação 7.4) que representa a transição da 7ª amostragem, na qual a ativação da região $60D$ não contribui para a mudança de estado.

Diante desta composição de regras, tem-se que os estados ditos finais caracterizam um determinado estímulo emocional. No caso específico do exame analisado, a Máquina atinge o estado q_{106} que é o estado indicativo de um reconhecimento do sentimento de medo, conforme descrito na Seção 7.3.

Durante a aplicação do Conjunto de Testes sobre as regras de produção, uma das falhas ocorridas foi durante o reconhecimento de uma emoção associada a raiva. O exame em questão encontra-se descrito a seguir. A Figura 7.8 apresenta cortes amostrais das imagens volumétricas do exame a ser apresentado.

- 1ª Amostragem: 11E
- 2ª Amostragem: 11E
- 3ª Amostragem: 11E 24E
- 4ª Amostragem: 11E 18E 24E

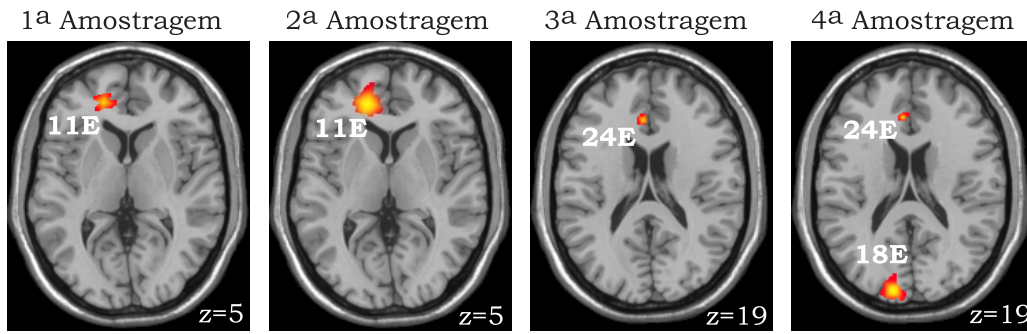


Figura 7.8: Cortes amostrais de uma imagem volumétrica representativa da ativação cerebral mediante um estímulo de raiva.

Neste caso não houve sucesso no reconhecimento, pois a máquina não consegue dar início ao processo de dedução, isto é, sair do estado q_0 . A explicação para este problema reside no fato de que a ativação 10D é a única que permite a transição para um novo estado (veja Tabela A.1). Como este exame não existe a ativação da região 10D na primeira amostragem, a Máquina de Inferência falha ao tentar realizar a dedução. Entende-se que a explicação mais clara para isto está relacionada com a quantidade de exames utilizados na fase de Extração de Heurísticas, que não foi suficiente para capturar todas as possíveis regras de produção.

O outro caso em que ocorreu uma falha, foi em um exame associado a alegria. De forma análoga ao caso anterior, a Máquina de Inferência falhou devido à falta de regras de produção capazes de prover as transições de estado necessárias. Novamente, o Espaço Amostral não foi suficiente para capturar todas as possíveis regras de produção necessárias para o reconhecimento desta emoção.

Acredita-se que as falhas ocorridas indicam a existência de uma provável gradação nos sentimentos descritos. Neste sentido, os exames onde ocorreram as falhas descrevem sentimentos com um grau que não é mapeado pela Máquina de Turing implementada. Na literatura científica observa-se que os trabalhos publicados nesta área evitam tratar o problema de níveis de intensidade de um mesmo sentimento, por estar diretamente vinculado a condições difíceis de serem mensuradas tais como as diferenças culturais, sociais, econômicas e psicológicas.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

A presente Tese insere-se no contexto de estudo espacial do processo de ativação neural do ser humano, mediante estímulos morais e emocionais. Neste sentido, foi apresentado um estudo no que se refere ao problema relacionado com a viabilidade em se criar um modelo computacional capaz de sistematizar o processo de ativação cerebral humano, segundo um determinado espectro de emoções. Como resultado, foi construída uma Máquina de Turing reconhedora de padrões de ativações cerebrais, permitindo concluir que é viável a construção de um algoritmo, ou resolutor, capaz de desempenhar a funcionalidade do reconhecimento de diferentes sentimentos emocionais.

O objeto de estudo foi o cérebro humano de pessoas tidas como sadias. As excitações às quais elas foram submetidas tiveram por finalidade estimular seus sentimentos morais e emocionais. O modelo computacional proposto e implementado está voltado ao processo mecânico, espacial e temporal da ativação cerebral, e não no processo químico, celular e psicológico. Sob esta ótica, evitou-se realizar a tradicional enumeração das relações <processo mental, área de ativação>.

O objetivo de propor um modelo computacional capaz de sistematizar o processo de ativação cerebral humano para um conjunto limitado de estímulos foi atingido com sucesso. Este cumprimento do objetivo foi materializado através da definição do conjunto de estímulos morais e emocionais que são tratados pelo modelo computacional implementado. Este modelo foi obtido a partir da construção um modelo tridimensional do cérebro humano que permite a representação espacial das áreas

fisiológicas do cérebro humano, e ainda, pela elaboração um Sistema Formal Reconhecedor capaz de deduzir uma seqüência de entrada (áreas cerebrais ativadas).

Os resultados obtidos evidenciam a possibilidade de aplicar os métodos da Teoria da Computação ao cérebro humano. Neste sentido, é possível afirmar que o processo de ativação cerebral estudado no contexto desta Tese é um problema computável. Contudo, não se trata de equiparar o cérebro a uma máquina computacional, mas sim de se empregar técnicas de análise que abstraem por completo a existência do dispositivo eletro-mecânico. De fato, esta é a beleza da Teoria da Computação, pois ela existe desde muito antes da criação do primeiro computador.

A presente Tese permite um avanço na compreensão do funcionamento do processo de ativação cerebral, e buscou materializar a questão sobre o cérebro humano como um objeto computável. Seu caráter original reside no fato de não existirem modelos computacionais do processo mecânico, espacial e temporal da ativação cerebral sob a ótica da Teoria da Computação. Os modelos disponíveis até o momento, estão associados a processos químicos, celulares e de cognição.

Apesar do limitado Espaço Amostral empregado na construção da Máquina de Turing, obteve-se um percentual elevado de sucesso na tarefa de reconhecimento dos sentimentos emocionais. As falhas ocorridas estão diretamente associadas a possíveis níveis de intensidade de sentimentos, que não foram contemplados nos experimentos coletados. Acredita-se que o número de falhas tenderá a ser minimizado com o aumento do Espaço Amostral, que possibilitará a representação mais apurada desta gradação de intensidade dos sentimentos.

Por fim, entende-se que é com ceticismo que se deve encarar a presunção da Ciência, no que se refere a sua objetividade e ao seu caráter definitivo. Tem-se dificuldade em aceitar que os resultados científicos, principalmente em neurociência computacional, sejam algo mais que aproximações provisórias para serem utilizadas por algum tempo, e abandonadas logo que surjam modelos melhores. No entanto, o ceticismo relativo ao atual alcance da Ciência, especialmente no que diz respeito à mente, não envolve menos entusiasmo na tentativa de melhorar estas aproximações

provisórias.

De modo a dar prosseguimento a pesquisa, sugerem-se algumas linhas de ação:

1. A primeira sugestão está relacionada com os exames empregados na fase de Extração de Heurísticas. Nesta Tese evidenciou-se que alguns dos reconhecimentos de ativações cerebrais não lograram êxito devido ao fato de que o Espaço Amostral não ser suficiente para capturar todas as possíveis regras de produção que descrevem o fenômeno. Este problema pode ser contornado aumentando-se a quantidade de exames a serem utilizados, que somente será possível obtendo-se acesso a novos bancos de dados de neuroimagens.
2. Os exames escolhidos para esta pesquisa compreendem apenas as emoções primárias. Este fato foi um efeito involuntário devido a critérios rígidos de seleção dos exames para a garantia de que o Espaço Amostral represente de forma fidedigna aos sentimentos relacionados aos estímulos emocionais, descritos na Seção 6.2. Como solução, sugere-se buscar experimentos que atendam aos critérios propostos, e que ao mesmo tempo, garantam criteriosamente a descrição de ativações cerebrais associadas às emoções secundárias.
3. Durante a montagem das regras de produção da Máquina de Turing, observou-se que valores emocionais com vários níveis de intensidade (e.g. pouco medo, muito medo, aterrorizado) tendem a ter um maior número de estados e regras. Seria interessante tentar verificar se existe alguma relação direta entre o número de níveis de intensidade e a quantidade de regras e estados na Máquina de Turing.
4. Além disto, a metodologia proposta reduz os volumes de ativação a centros matemáticos pontuais. Entende-se como uma contribuição positiva, a adaptação do algoritmo que detecta um ponto no interior de um volume para que o algoritmo implementado seja também capaz de determinar se um volume encontra-se interior a outro. Desta forma, poder-se-ia descartar o reducionismo dos volumes de ativação a um ponto, aumentando o grau de fidelidade com a real modelagem do fenômeno de ativação.

5. Por fim, seguindo uma linha mais psicanalista, poderá ser realizado um estudo sobre a necessidade da existência do cérebro para o funcionamento da mente. Sabe-se que a Teoria da Computação transcende a questão tecnológica para pesquisar seu objeto de estudo. Sob esta ótica, partindo do princípio que a Teoria da Computação é capaz de estudar o funcionamento da mente sob a ótica da computação analógica, pode-se igualmente dizer que através desta teoria é possível estudar a mente de forma independente do estado evolucionário do cérebro, ou até mesmo abstrair por completo a existência da massa cerebral. A Tese apresentada evidenciou que a informação espacial da ativação do cérebro humano permite sistematizar o reconhecimento de sentimentos emocionais. Se características abstratas ligadas ao psiquismo humano também puderem ser discretizadas, tornando-se uma computação discreta, então regras cognitivas poderão ser deduzidas e utilizadas na modelagem dos sentimentos sob a ótica da Psicanálise.

Referências Bibliográficas

- [1] EYZAGUIRRE, C., FIDONE, S. J., *Fisiologia do Sistema Nervoso*. 2 ed. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1994. p.261.
- [2] KANDEL, E. R., SCHWARTZ, J. H., JESSELL, T. M., *Principles of Neural Science*. 3 ed. New York, Elsevier, 1991. p.5-17/309-324.
- [3] PATOLA, W., COULTER, B., “MRI artifacts - Departamento de Radiologia, Hospital St. Paul, Vancouver, Canadá”, <http://wwwrad.pulmonary.ubc.ca/stpaulsstuff/MRartifacts.html>, 2005, (Acesso em 12 Junho 2005).
- [4] “Contrast and Contraindications - Hospital St. Michael, Toronto, Canadá”, http://www.stmichaelshospital.com/content/programs/medical_imaging/, 2005, (Acesso em 12 Junho 2005).
- [5] MOLL, J., OLIVEIRA-SOUZA, R. D., ESLINGER, P. J., *et al.*, “The Neural Correlates of Moral Sensitivity: A Functional Magnetic Resonance Imaging Investigation of Basic and Moral Emotions”, *The Journal of Neuroscience*, v. 22, n. 7, pp. 2730–2736, 2002.
- [6] DAVIS, M., *Game Theory: A Nontechnical Introduction*. Dover, 1997.
- [7] NEUMANN, J. V., MORGENSTERN, O., *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, Princeton University Press, 1944.
- [8] LUCE, R. D., RAIFFA, H., *Games and Decisions: introduction an critical survey*. New York, Dover, 1989. p.12-34.
- [9] FIANI, R., *Teoria dos Jogos: para cursos de administração e economia*. Rio de Janeiro, Elsevier, 2004.

- [10] ELSTER, J., *Rationality, economy and society*. Cambridge, Cambridge University Press, 2000.
- [11] ROUDINESCO, E., *Dicionário da psicanálise*. Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor, 1997.
- [12] BINMORE, K., *Fun and Games*. Lexington, D. C. Heath, 1992. p.51.
- [13] Camerer, C., Loewenstein, G., Rabin, M. (eds.), *Advances in Behavioral Economics*, , 2003.
- [14] LOEWENSTEIN, G., LERNER, J., *Handbook of Affective Science*, chapter The Role of Affect in Decision Making, Oxford, Oxford University Press, pp. 619–642, 2002.
- [15] MCCABE, K., HOUSER, D., RYAN, L., *et al.*, “A functional imaging study of cooperation in two-person reciprocal exchange”, *Proceedings on National Academy of Science of the USA*, v. 98, pp. 11832–11835, 2001.
- [16] SANFREY, A. G., RILLING, J. K., ARONSON, J. A., *et al.*, “The Neural Basis of Economic Decision-Making in the Ultimatum Game”, *Science Magazine*, v. 300, pp. 1755–1758, 2003.
- [17] GUTH, W., SCHMITTBERGER, R., SCHWARZE, B., “An experimental analysis of ultimatum bargaining”, *Journal of Economical Behaviour and Organization*, v. 3, pp. 367–388, 1982.
- [18] THALER, R., “The Ultimatum Game”, *Journal of Economical Perspectives*, v. 2, pp. 195–206, 1988.
- [19] BOLTON, G., ZWICH, R., “Anonymity versus punishment in ultimatum bargaining”, *Game and Economic Behaviour*, v. 10, pp. 95–121, 1995.
- [20] ROTH, A., *Handbook of Experimental Economics*, chapter Bargaining Experiments, Princeton, Princeton University Press, pp. 253–348, 1995.
- [21] HENRICH, J., BOYD, R., BOWLES, S., *et al.*, “In Search of Homo economicus: Experiments in 15 Small-Scale Societies”, *American Economist Review*, , n. 91, pp. 73–78, 2001.

- [22] CAMERER, C., THALER, R., “Anomalies: Ultimatums, Dictators and Managers”, *Journal of Economic Perspectives*, v. 9, n. 2, pp. 109–120, 1995.
- [23] PILLUTLA, M., MURNIGHAN, J. K., “Unfairness, anger, and spite: Emotional rejections of ultimatum offers”, *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, v. 68, pp. 208–224, 1996.
- [24] BLOOM, F., NELSON, C., LAZERSON, A., *Brain, Mind and Behavior*. 3 ed. New York, Worth Publishers Inc, 2000. p.151-173.
- [25] MALSON, L., *Les Enfants Sauvages: Mythe et réalité*. Paris, 10-18, 1996. p.54-57.
- [26] LENT, R., *Cem Bilhões de Neurônios*. São Paulo, Atheneu, 2004.
- [27] GILMAN, S., NEWMAN, S. W., *Essentials of Clinical Neuroanatomy and Neurophysiology*. 9th ed. Philadelphia, F. A. Davis Company, 1999. p.3-16/219-235.
- [28] HAINES, D. E., *Fundamental Neuroscience*, chapter Orientation to the Central Nervous System, New York, Churchill Livingstone, pp. 1–8, 1997.
- [29] WOOLDRIDGE, D. E., *The Machinery of the Brain*. New York, McGraw-Hill, 1969.
- [30] DAMASIO, A., *O erro de Descartes - emoção, razão e o cérebro humano*. 12th ed. São Paulo, Companhia das Letras, 1996.
- [31] FERRIER, D., “The Goulstonian Lectures on the localisation of cerebral diseases”, *British Medical Journal*, v. 1, pp. 399–447, 1878.
- [32] HARLOW, J., “Recovery from the passage of an iron bar through the head”, *Publications of the Massachusetts Society*, v. 2, pp. 327–347, 1868.
- [33] DOUGLAS, R. J., MARTIN, K. A. C., *The Synaptic Organization of the Brain*, 3 ed., chapter Neocortex, New York, Oxford University Press, pp. 389–438, 1990.

- [34] TALAIRACH, J., TOURNOUX, P., *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. New York, Thieme Medical, 1998.
- [35] BROIT, C., *Optimal registration of deformed images*. Ph.D. dissertation, Universidade da Pennsylvania, 1981.
- [36] BAJCSY, R., KOVACIC, S., “Multiresolution elastic matching”, *Computational Vision, Graphics and Image Processing*, v. 46, n. 1, pp. 1–21, 1989.
- [37] GEE, J. C., REIVICH, M., BAJCSY, R., “Elastically deforming an atlas to match anatomical brain images”, *Journal of Computerized Assisted Tomography*, v. 17, n. 2, pp. 225–236, 1993.
- [38] GEE, J. C., LEBRIQUER, L., BARILLOT, C., *et al.*, *Bayesian Approach to the BrainImage Matching Problem*, Report 95-08, Institute of Research in Cognitive Science, University of Pennsylvania, 1995.
- [39] THOMPSON, P. M., WOODS, R. P., TOGA, A. W., “A surface-based technique for warping 3-dimensional images of the brain”, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, v. 15, n. 1, pp. 1–16, 1996.
- [40] THOMPSON, P. M., WOODS, R. P., MEGA, M. S., *et al.*, “Mathematical/computational challenges in creating deformable and probabilistic atlases of the human brain”, *Human Brain Mapping*, v. 9, pp. 81–92, 2000.
- [41] BROTHERS, L., *Friday footprint: how society shapes the human mind*. 2 ed. New York, Oxford University Press, 1997. p.31-49.
- [42] GRIFFITHS, P., *What emotions really are: the problem of psychological categories*. Chicago, University of Chicago Press, 1997. p.8-9/23.
- [43] DARWIN, C., *A expressão das emoções no homem e nos animais*. 2 ed. São Paulo, Companhia das Letras, 2000. Tradução do original de 1872.
- [44] DAMASIO, A., *O Mistério da consciência*. 4 ed. São Paulo, Companhia das Letras, 2000. p.74-88.

- [45] SPERRY, R. W., GAZZANIGA, M. S., BOEGEN, J. E., *Handbook of clinical neurology*, v. 4, chapter Interhemispheric relations. The neocortical commissures; syndromes of their disconnection, Amsterdam, North-Holland, pp. 273–290, 1979.
- [46] SPERRY, R., ZAIDEL, E., ZAIDEL, D., “Self recognition and social awareness in the disconnected minor hemisphere”, *Neuropsychologia*, v. 17, pp. 153–166, 1979.
- [47] GAINOTTI, G., “Emotional behavior and hemispheric side of the lesion”, *Cortex*, v. 8, pp. 41–55, 1972.
- [48] GARDNER, H., BROWNELL, H., WAPNER, W., *et al.*, *Cognitive processes and the right hemisphere*, chapter Missing the point: the role of the right hemisphere in the processing of complex linguistic materials, , 1983.
- [49] HEILMAN, K., WATSON, R. T., BOWERS, D., *Neuropsychology of human emotion*, chapter Affective disorders associated with hemispheric disease, New York, The Guilford Press, pp. 45–64, 1983.
- [50] BOROD, J. C., “Interhemispheric and intrahemispheric control of emotion: a focus on unilateral brain damage”, *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, v. 60, pp. 339–348, 1992.
- [51] DAVIDSON, R., “Prolegomenon to emotion: gleanings from neuropsychology”, *Cognition and Emotion*, v. 6, pp. 245–268, 1992.
- [52] MAURANO, D., *Para que serve a psicanálise?* Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor, 2003.
- [53] CARVALHO, L. A. V., JUNIOR, E. C., “Psicanálise e neurociência: um diálogo possível?”, *Arquivos de Psiquiatria Neurologia e Medicina Legal*, pp. 13–20, 2002.
- [54] ROUDINESCO, E., *Por que a psicanálise?* Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor, 2000.

- [55] CANGUILHEM, G., “Le cerveau et la pensée”. In: *Georges Canguilhem - Philosophe, historien des sciences: Actes du Colloque*, pp. 11–33, Paris, 1993.
- [56] EDELMAN, G., TONOMI, G., *A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination*. Reprint (march, 2001) ed. New York, Basic Books, 2001.
- [57] GLEISER, M., *A Dança do Universo: dos mitos de criação ao Big-Bang*. 2 ed. São Paulo, Companhia das Letras, 1997.
- [58] HOLTON, G., *Thematic Origins of Scientific Thought*. 2 ed. Harvard University Press, 1988.
- [59] LUFKIN, R. B., *Manual de Ressonância Magnética*. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1999. c.1-7.
- [60] NUSSENZVEIG, H. M., *Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade e Física Quântica*. São Paulo, Edgard Blücher, 2001. p.254-257.
- [61] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., *Fundamentals of Physics (Extended)*. New York, John Wiley & Sons, 2002. p.985-1001.
- [62] KAUT, C., *MRI Workbook for Technologists*. New York, Raven Press, 1992.
- [63] MENDONÇA, R., CATTANI, C., GOMES, A., *Fundamentos de Ressonância Magnética*. General Eletric, July 1998.
- [64] LUFKIN, R., HANAFEE, W., *NMR update series*, chapter Comparison of superconductive, resistive and permanent manet MR imgaging, , 1984. c.1-7.
- [65] ROEMER, P. B., “Simultaneous Multiple Surface Coil NMR Imaging”, *Proceedings of the SMRM*, , n. 875, 1988.
- [66] BEISER, A., *Concepts of Modern Physics*. New York, McGraw-Hill, 1997.
- [67] NUSSENZVEIG, H. M., *Curso de Física Básica: Eletromagnetismo*. São Paulo, Edgard Blücher, 2002. p.127-185.
- [68] STRAUSS, E., OLIVEIRA, A., *Imagens Médicas: Aquisição, Processamento e Análise*, Notas de aula, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Agosto 2001.

- [69] ROTH, K., *NMR-tomography and spectroscopy in medicine*. New York, Springer-Verlag, 1984.
- [70] FARRAR, T. C., BECKER, E. D., *Pulse and Fourier transform NMR*. New York, Academic Press, 1971.
- [71] DUONG, T., YACOUB, E., ADRIANY, G., “High-Resolution, Spin-Echo Bold, ad CBF fMRI at 4 and 7 T”, *Magnetic Resonance in Medicine*, v. 48, pp. 589–593, 2002.
- [72] LOGOTHETIS, N., MERKLE, H., AUGATH, M., “Ultra High-Resolution fMRI in Monkeys with Implanted RF Coils”, *Neuron*, v. 35, pp. 227–242, 2002.
- [73] KIM, S.-G., OGAWA, S., “Insights into new techniques for high resolution functional MRI”, *Current Opinion in Neurobiology*, v. 12, pp. 607–615, 2002.
- [74] BENAR, C., GROSS, D., WANG, Y., “The Bold response to interictal epileptiform discharges”, *Neuroimage*, v. 17, pp. 1182–1192, 2002.
- [75] HEEGER, D., RESS, D., “What Does fMRI Tell Us About Neuronal Activity?”, *Nature Reviews/Neuroscience*, v. 3, pp. 142–151, 2002.
- [76] DOBBS, D., “Fact Or Phrenology?”, *Scientific American Mind*, v. 16, pp. 24–31, 2005.
- [77] ROBINSON, R., “fMRI Beyond The Clinic: Will It Ever Be Ready for Prime Time?”, *PLoS (Public Library of Science) Biology*, v. 2, pp. e150, 2004.
- [78] TANCREDI, L., “The New Lie Detectors”, *Scientific American Mind*, v. 16, pp. 46–47e, 2005.
- [79] ZALD, D. H., PARDO, J., “Emotion, olfaction and the human amygdala: amygdala activation during aversive olfactory stimulation”, *The National Academy of Sciences of the USA*, v. 94, pp. 4119–4124, 1997.
- [80] ROYET, J.-P., PLAAILLY, J., DELON-MARTIN, C., *et al.*, “fMRI of emotional responses to odors: influence of hedonic valence and judgment, handedness and gender”, *NeuroImage*, v. 20, pp. 713–728, 2003.

- [81] HAIDT, J., “The emotional dog and its rational tail: a social intuitionist approach to moral judgment”, *Psychological Review*, v. 108, pp. 814–834, 2001.
- [82] ROZIN, P., LOWERY, L., IMADA, S., *et al.*, “The CAD triad hypothesis: a mapping between three moral emotions (contempt, anger, disgust) and three moral codes (community, autonomy, divinity)”, *Journal of Personality and Social Psychology*, v. 76, pp. 574–586, 1999.
- [83] COHEN, A., ROZIN, P., “Religion and the morality of mentality”, *Journal of Personality and Social Psychology*, v. 81, pp. 697–710, 2001.
- [84] GREENE, J., HAIDT, J., “How (and where) does moral judgment work?”, *Trends in Cognitive Sciences*, v. 6, pp. 517–523, 2002.
- [85] CASEBEER, W., “Moral cognition and its neural constituents”, *Neuroscience*, v. 4, pp. 841–846, 2003.
- [86] SAVER, J. L., DAMASIO, A. R., “Preserved access and processing of social knowledge in a patient with acquired sociopathy due to ventromedial frontal damage”, *Neuropsychologia*, v. 29, pp. 1241–1249, 1991.
- [87] BECHARA, A., DAMASIO, A. R., DAMASIO, H., *et al.*, “Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex”, *Cognition*, v. 50, pp. 7–15, 1994.
- [88] ANDERSON, S. W., BECHARA, A., DAMASIO, H., *et al.*, “Impairment of social and moral behavior related to early damage in human prefrontal cortex”, *Nature Neuroscience*, v. 2, pp. 1032–1037, 1999.
- [89] MOLL, J., OLIVEIRA-SOUZA, R. D., BRAMATI, I. E., *et al.*, “Functional networks in emotional moral and non-moral social judgments”, *Neuroimage*, , n. 16, pp. 696–703, 2002.
- [90] GREENE, J., *The Innate Mind: Structure And Contents*, chapter Cognitive Neuroscience and the Structure of Moral Mind, Oxford, Oxford University Press, pp. 63–88, 2005.

- [91] MOLL, J., ESLINGER, P. J., OLIVEIRA-SOUZA, R., “Frontopolar and anterior temporal cortex activation in a moral judgement task: preliminary functional MRI results in normal subjects”, *Archives of Neuropsychiatry*, , n. 59, pp. 657–664, 2001.
- [92] FARROW, T. F., ZHENG, Y., WILKINSON, I. D., *et al.*, “Investigating the functional anatomy of empathy and forgiveness”, *Neuroreport*, , n. 12, pp. 2433–2438, 2001.
- [93] GREENE, J., SOMMERVILLE, B., NYSTROM, L., *et al.*, “An fMRI Investigation of Emotional Engagement in Moral Judgment”, *Science Magazine*, v. 293, pp. 2105–2108, 2001.
- [94] FLACK, J. C., WAAL, F. B. M. D., *Evolutionary Origins of Morality*, chapter Any animal whatever: Darwinian building blocks of morality in monkeys and apes, New York, Imprint Academic, pp. 1–29, 2000.
- [95] TRIVERS, R. L., “The evolution of reciprocal altruism”, *Quarterly Review of Biology*, , n. 46, pp. 35–57, 1971.
- [96] PINKER, S., *How the mind works*. New York, W W Norton, 1999.
- [97] “Testing materials (dilemmas) from Science Online”, <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/293/5537/PAGE/DC1>, 2001, (Acesso em 19 Outubro 2005).
- [98] LEDOUX, J., “The Neural Circuits Underlying Anxiety and Fear”, *Biology Psychiatry*, v. 44, pp. 1229–1238, 1998.
- [99] ÖHMAN, A., *Handbook of the Emotions*, chapter Fear and anxiety as emotional phenomena: Clinical, phenomenological, evolutionary perspectives, and information-processing mechanisms, New York, Guilford, pp. 511–536, 1992.
- [100] ADOLPHS, R., TRANET, D., DAMASIO, H., *et al.*, “Impaired recognition of the emotion in facial expressions following bilateral damage to the human amygdala”, *Nature*, v. 372, pp. 669–672, 1994.

- [101] YOUNG, A. W., AGGLETON, J. P., HELLAWEELL, D. J., *et al.*, “Face processing impairments after amygdalotomy”, *Brain*, v. 118, pp. 15–24, 1995.
- [102] FRITH, C. D., PERRETT, D. I., ROWLAND, D., *et al.*, “A differential neural response in the human amygdala to fearful and happy facial expressions”, *Nature*, v. 383, pp. 812–815, 1996.
- [103] ADOLPHS, R., TRANEL, D., HAMANN, S., *et al.*, “Recognition of facial emotion in nine subjects with bilateral amygdala damage”, *Neuropsychologia*, v. 37, pp. 1111–1117, 1999.
- [104] SCHMOLCK, H., SQUIRE, L. R., “Impaired perception of facial emotions following bilateral damage to anterior temporal lobe”, *Neuropsychologia*, v. 15, pp. 30–38, 2001.
- [105] ADAMS, R. B., GORDON, L. H., BAIRD, A. A., *et al.*, “Effects of gaze on amygdala sensitivity to anger and fear faces”, *Science*, v. 300, pp. 1536, 2003.
- [106] EKMAN, P., FRIESEN, W., *Pictures of facial affect*. Palo Alto, CA, Consulting Psychologists Press, 1976.
- [107] ADOLPHS, R., GOSSELIN, F., BUCHANAN, T., *et al.*, “A mechanism for impaired fear recognition after amygdala damage”, *Nature*, v. 433, pp. 68–72, 2005.
- [108] GOSSELIN, F., SCHYNS, P. G., “Bubbles: a technique to reveal the use of information in recognition”, *Vision Research*, v. 41, pp. 2261–2271, 2001.
- [109] SCHYNS, P. G., BONNAR, L., GOSSELIN, F., “Show me the features! Understanding recognition from the use of visual information”, *Psychological Science*, v. 13, pp. 402–409, 2002.
- [110] HOFFMAN, E., HAXBY, J., “Distinct representations of eye gaze and identity in the distributed human neural system for face perception”, *Nature Neuroscience*, v. 3, pp. 80–84, 2000.
- [111] GELDER, B., VROOMEN, J., POURTOIS, G., *et al.*, “Affective blindsight: are we blindly led by emotions?”, *Trends in Cognitive Sciences*, v. 4, pp. 126–127, 2000.

- [112] TOGA, A. W., “Neuroimage databases: the good, the bad and the ugly”, *Nature Reviews: Neuroscience*, v. 3, n. 4, pp. 302–309, 2002.
- [113] ROGERS, L. F., “PACS: radiology in the digital world”, *American Journal of Roentgenology*, , n. 177, pp. 499, September 2001.
- [114] VALADÃO, J. T., *Stremming de imagens médicas digitais*. M.Sc. dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Janeiro 2004.
- [115] MEGA, M. S., FENNEMA, C. N., DINOV, I. D., *et al.*, “Construction, testing, and validation of a sub-volume probabilistic human brain atlas for the elderly and demented populations”, *Neuroimage*, v. 11, n. 5, pp. S597, 2000.
- [116] NARR, K. L., THOMPSON, P. M., T, T. S., *et al.*, “3D mapping of gyral shape and cortical surface asymmetries in schizophrenia: gender effects”, *American Journal of Psychiatry*, v. 158, n. 2, pp. 244–255, 2001.
- [117] SOWELL, E. R., THOMPSON, P. M., TESSNER, K. D., *et al.*, “Mapping continued brain growth and gray matter density reduction in dorsal frontal cortex: inverse relationships during post adolescent brain maturation”, *Journal of Neuroscience*, , n. 21, pp. 8819–8829, 2001.
- [118] BLOOM, F. E., YOUNG, W. G., KIN, W. M., *Brain Browser*. San Diego, Academic Press, 1990.
- [119] SWANSON, L. W., *Brain Maps: Structure of the rat brain*. Amsterdam, Elsevier, 1992.
- [120] MARTIN, R. F., BOWDEN, D. M., “A stereotaxic template atlas of the macaque brain for digital imaging and quantitative neuroanatomy”, *Neuroimage*, , n. 4, pp. 119–150, 1996.
- [121] TOGA, A. W., CANNISTRA, A. F., “A three dimensional multi-modality brain map of the nemistrina monkey”, *Neuroscience Abstracts*, , n. 22, pp. 675, 1996.
- [122] DHENAIN, M., RUFFINS, S. W., JACOBS, R. E., “Three-dimensional digital mouse atlas using high-resolution MRI”, *Developmental Biology*, v. 232, n. 2, pp. 458–470, 2001.

- [123] KAUFMAN, M. H., BRUNE, R. M., DAVIDSON, D. R., *et al.*, “Computer-generated three-dimensional reconstructions of serially sectioned mouse embryos”, *Journal of Anatomy*, v. 193, n. 3, pp. 323–336, 1998.
- [124] NOWINSKI, W. L., BRYAN, R. N., RAGHAVAN, R., *The Electronic Clinical Brain Atlas: Multiplanar Navigation of the Human Brain*. New York/Stuttgart, Thieme Medical, 1997.
- [125] “LONI: Laboratory of Neuro Imaging”, <http://www.loni.ucla.edu/index.shtml>, 2005, (Acesso em 24 Outubro 2005).
- [126] RADEMACHER, J., CAVINESS, V. S., STEINMETZ, H., *et al.*, “Topographical variation of the human primary cortices: implications for neuroimaging, brain mapping and neurobiology”, *Cerebral Cortex*, v. 3, pp. 313–329, 1993.
- [127] ROLAND, P. E., ZILLES, K., “Brain atlases - a new research tool”, *Trends on Neuroscience*, v. 17, pp. 458–467, 1994.
- [128] “Unified Medical Language System (UMLS)”, <http://www.nlm.nih.gov/research/umls/umlsmain.html>, 2005, (Acesso em 05 Outubro 2005).
- [129] KANDEL, E. R., SIEGELBAUM, S. A., *Principles of Neural Science*, 4 ed., chapter Transmitter Release, New York, McGraw Hill, pp. 253–279, 2000.
- [130] SCHWARTZ, J. H., *Principles of Neural Science*, 4 ed., chapter Neurotransmitters, New York, McGraw Hill, pp. 280–297, 2000.
- [131] MCCORMICK, D. A., *Fundamental Neuroscience*, chapter Membrane potential and action potential, New York, Academic Press, pp. 129–154, 1999.
- [132] KOESTER, J., SIEGELBAUM, S. A., *Principles of Neural Science*, 4 ed., chapter Propagated signaling: the action potential, New York, McGraw Hill, pp. 150–172, 2000.
- [133] FERREIRA, N. D. C., *Um modelo neurocomputacional do autismo*. M.Sc. dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Julho 1999.

- [134] NURDES, D. Q., *Delírio e Criatividade: Uma abordagem neurocomputacional*. M.Sc. dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Agosto 2000.
- [135] PECK, V. A., JOHN, B. E., “Browser-Soar: a computational model of a highly interactive task”. In: *CHI '92: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 165–172, New York, NY, USA, 1992.
- [136] NEWELL, A., “SOAR as a unified theory of cognition: Issues and explanations”, *Behavioral and Brain Sciences*, v. 15, n. 3, pp. 464–492, 1992.
- [137] MILLER, C. S., LEHMAN, J. F., KOEDINGER, K. R., “Goals and learning in microworlds”, *Cognitive Science*, v. 23, n. 3, pp. 305–336, 1999.
- [138] COOPER, R., SHALLICE, T., “SOAR and the case for unified theories of cognition”, *Cognition*, v. 55, n. 2, pp. 115–149, 1995.
- [139] ALTMANN, E. M., JOHN, B. E., “Episodic indexing: A model of memory for attention events”, *Cognitive Science*, v. 23, n. 2, pp. 117–156, 1999.
- [140] ANDERSON, J. R., MATESSA, M., LEBIERE, C., “ACT-R: A theory of higher level cognition and its relation to visual attention”, *Human-Computer Interaction*, v. 12, pp. 439–462, 1997.
- [141] ANDERSON, J. R., BOTHELL, D., BYRNE, M. D., *et al.*, “An Integrated Theory of the Mind”, *Psychological Review*, v. 111, n. 4, pp. 1036–1060, 2004.
- [142] KIERAS, D. E., WOOD, S. D., MEYER, D. E., “Predictive engineering models using the EPIC architecture for a high-performance task”. In: *CHI '95: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 11–18, New York, NY, USA, 1995.
- [143] MEYER, D. E., KIERAS, D. E., *Precis to a practical unified theory of cognition and action: some lessons from EPIC computational models of human multi-task performance*, Report TR-97/ONR-EPIC-08, Department of Psychology, Electrical Engineering & computer Science Department, University of Michigan, 1997.

- [144] SCHUMACHER, E. H., SEYMOUR, T. L., GLASS, J. M., *et al.*, “Virtually perfect time sharing in dual-task performance: Uncorking the central cognitive bottleneck”, *Psychological Science: Special Issue*, v. 121, n. 2, pp. 2101–2108, 2001.
- [145] COWIE, R., CORNELIUS, R., “Describing the Emotional States that are Expressed in Speech”, *Speech Communication on Speech and Emotion: Special Edition*, v. 40, n. 2, pp. 5–32, 2003.
- [146] CHORVAT, T., MCCABE, K., “The brain and the law”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 359, pp. 1727–1736, 2004.
- [147] WOOD, J., GRAFMAN, J., “Human prefrontal cortex: processing and representational perspectives”, *Nature Neuroscience*, , n. 4, pp. 139–147, 2003.
- [148] ROLAND, P., ZILLES, K., *Proceedings in Towards an understanding of integration of brain function*, v. 26, *Brain Research Reviews*, chapter Structural divisions and functional fields in the human cortex, New York, Elsevier Science, pp. 87–105, 1998.
- [149] NETTLE, P., “Brain Voyager - a product for brain innovation B.V.”, <http://www.brainvoyager.com/>, 2006, (Acesso em 05 Janeiro 2006).
- [150] MELLO, F. L. D., *Visualização Tridimensional de Teatros de Guerra*. M.Sc. dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Julho 2003.
- [151] NETTLE, P., “Collision Detection”, <http://www.flipcode.com/tutorials/tutcollision.shtml>, 2000, (Acesso em 29 Janeiro 2000).
- [152] CARVAHO, R. L., OLIVEIRA, C. M. G., *Modelos de Computação e Sistemas Formais*. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998.
- [153] DIVERIO, T. A., MENEZES, P. B., *Teoria da Computação - Máquinas Universais e Computabilidade*. Porto Alegre, Sagra Luzzatto, 2003.
- [154] LEWIS, H. R., PAPADIMITRIOU, C. H., *Elementos de Teoria da Computação*. Porto Alegre, Bookman, 2004.

- [155] WITTY, G., “Witty - Provador Automático de Teoremas”, 2006, (distribuição acadêmica).

Apêndice A

Regiões de Ativação Segundo Estímulos Emocionais

RAIVA		
<i>Amostragem</i>	<i>Possíveis Regiões Cerebrais Ativas</i>	<i>Estado</i>
1 ^a	10D	q_1
2 ^a	11E	q_2
	10D, 11E	q_3
3 ^a	24E	q_4
	11E, 24E	q_5
	10D, 11E, 24E	q_6
4 ^a	11E, 18D, 24E	q_7^*
	11E, 18D	q_8^*
	10D, 11E, 18D	q_9^*

Tabela A.1: Amostragens da evocação de raiva evidenciando as regiões ativadas e seus respectivos estados de transição.

REPUGNÂNCIA		
<i>Amostragem</i>	<i>Possíveis Regiões Cerebrais Ativas</i>	<i>Estado</i>
1 ^a	07D, 18E, 21D	q_{10}
	19D, 21D	q_{11}
	60E, 61E	q_{12}
2 ^a	07D, 21D, 46D	q_{13}
	19E, 19D	q_{14}
	21D, 34E, 46D	q_{15}
	60E, 61E, 62D	q_{16}^*
3 ^a	19D, 21D, 34E	q_{17}
	19D, 34E	q_{18}
	21D, 34E, 45D	q_{19}
	21D, 46D	q_{20}
4 ^a	34E, 60D	q_{21}
	46D, 62D	q_{22}
5 ^a	34E, 60D, 62D, 64D	q_{23}^*

Tabela A.2: Amostras da evocação de repugnância evidenciando as regiões ativadas e seus respectivos estados de transição.

ALEGRIA		
<i>Amostragem</i>	<i>Possíveis Regiões Cerebrais Ativas</i>	<i>Estado</i>
1 ^a	03E, 06E, 61E	Q ₂₄
	03E, 18D	Q ₂₅
	06E, 06D, 61E	Q ₂₆
	06E, 20D, 61E	Q ₂₇
	06E, 22D	Q ₂₈
2 ^a	03E, 63E	Q ₂₉ *
	06E, 06D, 18D, 31E	Q ₃₀
	06E, 06D, 20D, 22D, 44D	Q ₃₁
	06E, 08E, 20D, 22D	Q ₃₂
	08E, 08D, 31E, 61E	Q ₃₃
	08D, 09D, 37D, 61E	Q ₃₄
	20D, 22D, 61E	Q ₃₅
3 ^a	08E, 08D, 09D, 20D, 22D	Q ₃₆
	08D, 09D, 21E, 37D, 61E, 61D	Q ₃₇
	08D, 09D, 21E, 61E	Q ₃₈
	08E, 20D, 22D, 61E	Q ₃₉ *
	08D, 37D, 44E, 44D, 61D	Q ₄₀
	9E, 22D, 44D	Q ₄₁
4 ^a	08D, 09D, 44D, 62E	Q ₄₂ *
	08D, 21E, 44E, 61E	Q ₄₃
	08D, 39E, 44D, 61E, 61D	Q ₄₄
	08D, 44E, 44D, 61D	Q ₄₅
	09E, 22D, 44D	Q ₄₆
	37D, 39E, 44D, 61E	Q ₄₇
5 ^a	08D, 39E, 44E, 44D	Q ₄₈ *

Tabela A.3: Amostragens da evocação de alegria evidenciando as regiões ativadas e seus respectivos estados de transição.

TRISTEZA		
<i>Amostragem</i>	<i>Possíveis Regiões Cerebrais Ativas</i>	<i>Estado</i>
1 ^a	06D, 09D	Q49
	09D, 62E	Q50
	19D, 19E	Q51
2 ^a	09D, 19E	Q52
	09D, 19E, 22E	Q53
	09D, 22E	Q54
	19E, 19D, 22E, 47D	Q55
3 ^a	09D, 18E, 45E, 47D	Q56
	09D, 22D, 45D	Q57
	18D, 45E, 47D, 62E	Q58
	19E, 19D, 22E, 22D	Q59
	22E, 47D, 60E	Q60*
4 ^a	09D, 18E, 22E, 47D	Q61
	09D, 22D, 30E, 45D, 62D	Q62
	18E, 18D, 25E, 45D, 62E	Q63
	18E, 22D, 45D	Q64
	19E, 21D, 30E, 60E	Q65
	22E, 31E, 45D, 47D	Q66
5 ^a	18E, 18D, 25E, 31E, 62E	Q67
	18E, 25E, 31E, 39E, 45E, 45D	Q68
	22D, 45D, 60E, 62E	Q69*
	30E, 39E, 62E, 63E	Q70
	30E, 47D, 60E, 62E	Q71
6 ^a	18E, 22E, 31E, 60D	Q72*
	22E, 30E, 45D, 60E, 63E	Q73*

Tabela A.4: Amostras da evocação de tristeza evidenciando as regiões ativadas e seus respectivos estados de transição.

MEDO		
<i>Amostragem</i>	<i>Possíveis Regiões Cerebrais Ativas</i>	<i>Estado</i>
1 ^a	04D, 06E, 06D, 24E, 24D, 32D, 34E, 60D	Q74
	09E, 09D, 32D, 60D	Q75
	09D, 21E, 22D, 61D	Q76
	13E, 19E, 20E, 38D, 60D	Q77
	13D, 32E, 47D, 60E, 61E	Q78
2 ^a	06E, 08E, 22E, 24D, 60E	Q79
	09E, 13E, 19E, 60D	Q80
	09D, 22D, 25E, 25D, 44D	Q81
	09D, 22D, 61D, 62D	Q82*
	10D, 19E, 20E, 60E, 60D	Q83
	30E, 47D, 60E, 61E	Q84
3 ^a	04D, 06E, 22D, 60E	Q85
	04E, 10D, 60E, 60D, 61E	Q86
	06E, 06D, 10D, 18D, 60D	Q87
	17D, 47D, 60E, 61E	Q88
	19E, 19D, 36D, 60E, 60D	Q89
	19E, 20E, 36D, 60E	Q90
	60E, 61E	Q91
4 ^a	04E, 06D, 10D, 60E	Q92
	06D	Q93*
	19E, 19D, 30D, 60D, 62E	Q94
	19E, 20E, 36E, 36D, 62E	Q95
	22E, 22D, 60E, 61E	Q96
5 ^a	04E, 06D, 10D, 60E	Q97
	10D, 19E, 19D, 24D	Q98
	37E, 60E, 60D	Q99
	19E, 60D	Q100
	19E, 30D, 36D, 62E	Q101
6 ^a	09E, 22D, 44D	Q102
	10D, 19D, 60D	Q103
	10D, 37E, 60E, 60D	Q104
	19E, 19D, 36D, 37E	Q105
7 ^a	10D, 19D, 37E	Q106*

Tabela A.5: Amostras da evocação de medo evidenciando as regiões ativadas e seus respectivos estados de transição.