

---

# Efeitos Comportamentais Decorrentes da Radiação de Microondas na Frequência de Operação Utilizada pelos Aparelhos Celulares

Anna Karina Ribeiro Lopes

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre.

Área de Concentração: Efeitos da Radiação - Comunicações

Marcelo Sampaio de Alencar, Ph.D.

Orientador

---

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Anna Karina Ribeiro Lopes, Março de 2003

---



**L864e  
2003**

**Lopes, Anna Karina Ribeiro**

**Efeitos comportamentais da radiação de microondas na frequência de operação utilizada pelos aparelhos celulares/ Anna Karina Ribeiro Lopes. - Campina Grande: UFCC, 2003.**

**121 p.: il.**

**Dissertação (mestrado em Eng. Elétrica) - UFCC/CCT/DEE**

**Inclui bibliografia**

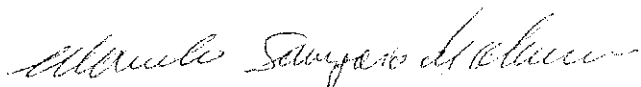
**1. Microondas – Efeitos Comportamentais 2. Efeitos da Radiação – Microondas 3. Comunicações Móveis - Radiação**

**CDU: 621.395.721.5:537.531**

**EFEITOS COMPORTAMENTAIS DECORRENTES DA RADIAÇÃO  
DE MICROONDAS NA FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO UTILIZADA PELOS  
APARELHOS CELULARES**

**ANNA KARINA RIBEIRO LOPES**

Dissertação Aprovada em 28.03.2003



**PROF. MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG**  
Orientador



**PROF. BENEDITO GUIMARÃES AGUIAR NETO, Dr.-Ing., UFCG**  
Componente da Banca



**PROF. ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., CEFET-PB**  
Componente da Banca



**PROFa. SHAKUNTLA NAIN, Mestre, UFCG**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
Março - 2003

## Dedicatória

Aos meus pais, Clidenor e Maria José, e ao meu noivo, Pedro, pelo amor, incentivo e paciência, mostrando-me sempre que vale a pena sonhar e lutar por nossos objetivos.



## Agradecimentos

- A Deus, por tudo;
- Aos meus pais, Clidenor e Maria José, pelo amor , incentivo e compreensão em todos os momentos;
- A meu noivo Pedro, pelo amor, companheirismo e apoio incondicionais;
- As minhas grandes amigas Camila, Sissi e Mariana que mesmo distantes me incentivam até hoje;
- Ao professor Marcelo Sampaio de Alencar, pela orientação, incentivo e palavras de apoio;
- A professora Shakuntla Nain, pelos ensinamentos e incentivo;
- Aos professores Marcelino e Alfredo, pelo apoio;
- Aos professores Ewerton Pombo, Fátima Turnel, Gutemberg e Bruno Albert, pela amizade e incentivo;
- Ao meu amigo e colega de pós-graduação Waslon, pelos ensinamentos e auxílio sempre;
- Aos meus colegas de trabalho Danilo Dantas, Jerônimo Rocha, Monica Carvalho e Paulo Ribeiro, pelo empenho e apoio imprescindíveis;
- As minhas colegas, Dagjane Frazão e Ana, pelo auxílio;
- Aos meus colegas de pós-graduação Edmar, Galdino, Fabrício, Wamberto e demais, uma lista de boas pessoas que não caberia aqui;
- Aos demais professores do DEE-UFCG;
- A todos os funcionários, em especial, a Paulino, pela colaboração e amizade, e ao colega Ronaldo, pelo apoio técnico;

- Ao CCT e CCBS da UFCG, ao CEFET-PB e a TIM pelo apoio;
- Ao CNPq, órgão financiador deste trabalho;
- A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram e incentivaram a presente pesquisa.

## Resumo

Face à polêmica a respeito de possíveis danos à saúde humana relacionados à radiação de microondas emitida pelos aparelhos celulares e à inviabilidade de realizar testes laboratoriais desta natureza em seres humanos, esta pesquisa tem por finalidade apresentar uma avaliação preliminar dos efeitos comportamentais observados em indivíduos da espécie *Rattus norvegicus* submetidos a este tipo de radiação não ionizante.

No decorrer do projeto foi utilizada como fonte geradora da radiação um transmissor analógico AMPS e uma antena do tipo Dipolo Log-Periódica operando a uma frequência média de 850 MHz e irradiando, durante um período diário de uma hora, uma densidade de potência de  $0,6 \text{ mW/cm}^2$ , limite máximo de segurança estabelecido pelas normas internacionais para a exposição de humanos sujeitos inconscientemente à radiação de microondas para este valor de frequência.

Para análise comportamental foram realizadas durante as pesquisas experiências como o teste com a Gaiola de Skinner e o experimento com o Labirinto Aquático (Tanque de Morris), que visam avaliar a aprendizagem e memorização, e o teste com o Labirinto Elevado em Forma de Cruz, utilizado no estudo do nível de ansiedade e estresse dos animais. Ao longo do trabalho foi efetuada também a pesagem dos ratos bem como o monitoramento do consumo de água e ração.

Os resultados da pesquisa indicam um aumento do consumo de água dos animais do grupo experimental, ausência de diferenças significativas no aprendizado entre machos e fêmeas do grupo de controle e grupo experimental no labirinto aquático, uma maior atividade locomotora dos ratos do grupo de controle no labirinto em cruz, porém um menor nível de estresse por parte dos sujeitos do grupo experimental e, por fim, nos testes com a gaiola de Skinner, nos exercícios de aprendizagem, os indivíduos do grupo de controle apresentaram melhor desempenho comparado aos ratos do grupo experimental. De modo geral, exceto para os resultados do experimento com a gaiola de Skinner, não foram observadas influências significativas da radiação de microondas utilizada no trabalho sobre o comportamento e desempenho dos animais.

## Abstract

Because of the controversy concerning possible human health damages connected to microwave radiation from cellular mobile telephones and the inviability, for ethic questions, of doing laboratory studies with human beings, this research presents a preliminary analysis of behavioral effects on rats of the species *Rattus norvegicus* subject to this eletromagnetic radiation.

An analogical transmitter (AMPS) was used as the radiated source and an LPD antenna in the 850 MHz frequency range and irradiating a power density of 0,6 mW/cm<sup>2</sup> (which represents the maximum security level adopted by international regulatory bodies, for human beings submitted to radiation in that frequency), applied for a period of one hour, every day.

The behavioral analysis included several experiments, like the Skinner Cage Test and the Morris Water Maze Test, used to evaluate learning and memory, and the Elevated Cross Form Maze Experiment, whose main objective was to verify the stress level of the animals. The weight of the rats, the water and food in take were also measured.

In general, as a result of this research wasn't verify significant influence of microwave radiation over rats behavior and their performance in experiments, except for Skinner Cage Test results.

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

*ANSI* – American National Standards Institute

*DNA* – Ácido Desoxirribonucléico

*DoD* – Department of Defense of EUA

*EM* – Eletromagnética

*EMC* – Compatibilidade Eletromagnética

*ERB* – Estação Radiobase

*ERP* – *Effective Radiated Power*

*FCC* – *Federal Communications Commission*

*GC* – Grupo Controle

*GE* – Grupo Experimental

*GSM* – *Global System for Mobile Communication*

*IEEE* – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

*IRPA* – *International Radiation Protection Association*

*LPD* – Dipolo Log-Periódico

*NCRP* – *National Council on Radiation Protection*

*NTP* – Programa Nacional de Toxologia dos EUA

*OMS* – Organização Mundial de Saúde

*RF* – Radiofrequência

*RNA* – Ácido Ribonucléico

*SAR* – *Specific Absorption Rate*

$S^D$  – Estímulo Discriminativo Indicando a Presença de Luz

$S^A$  – Estímulo Discriminativo Indicando a Ausência de Luz

*SMC* – Sistema Móvel Celular

# Lista de Figuras

2.1	Curva da SAR em função da frequência para um rato médio e um homem de estatura mediana. . . . .	13
4.1	Foto da Gaiola de Skinner usada nos testes. . . . .	28
4.2	Foto do labirinto em cruz. . . . .	32
4.3	Foto da estrutura montada para coleta de dados. . . . .	33
4.4	Foto do labirinto aquático. . . . .	35
5.1	<i>Rattus norvegicus</i> , sujeito experimental. . . . .	40
5.2	Estrutura na qual os ratos estão alocados. . . . .	41
5.3	Vista posterior do conjunto transmissor analógico e antena LPD. . . . .	43
5.4	Ilustração do procedimento usado para a construção do diagrama de radiação. . . . .	45
5.5	Diagrama de radiação da antena LPD. . . . .	45
5.6	Foto dos indivíduos com abscessos na área do pescoço. . . . .	47
6.1	Treinos nas plataformas altas (30 dias). . . . .	53
6.2	Treinos nas plataformas altas (60 dias). . . . .	53
6.3	Treinos nas plataformas altas (90 dias). . . . .	54
6.4	Treinos nas plataformas baixas (30 dias). . . . .	54
6.5	Treinos nas plataformas baixas (60 dias). . . . .	55
6.6	Treinos nas plataformas baixas (90 dias). . . . .	55
6.7	Análise quanto à altura das plataformas - 1ª Sessão (30 dias). . . . .	58
6.8	Análise quanto à altura das plataformas - 1ª Sessão (60 dias). . . . .	59

6.9	Análise quanto à altura das plataformas - 1ª Sessão (90 dias). . . . .	59
6.10	Análise quanto à altura das plataformas - 2ª Sessão (30 dias). . . . .	60
6.11	Análise quanto à altura das plataformas - 2ª Sessão (60 dias). . . . .	60
6.12	Análise quanto à altura das plataformas - 2ª Sessão (90 dias). . . . .	61
6.13	Análise quanto às cores das plataformas - 1ª Sessão (30 dias). . . . .	61
6.14	Análise quanto às cores das plataformas - 1ª Sessão (60 dias). . . . .	62
6.15	Análise quanto às cores das plataformas - 1ª Sessão (90 dias). . . . .	62
6.16	Análise quanto às cores das plataformas - 2ª Sessão (30 dias). . . . .	63
6.17	Análise quanto às cores das plataformas - 2ª Sessão (60 dias). . . . .	63
6.18	Análise quanto às cores das plataformas - 2ª Sessão (90 dias). . . . .	64
6.19	Taxa de 'abertos/total' para os animais com 30, 60 e 90 dias. . . . .	66
6.20	Resultados do intervalo variável. . . . .	70
6.21	Histograma com os resultados da extinção . . . . .	71
A.1	Gráfico para entendimento da definição de intervalo de confiança. . . .	91
A.2	Gráfico de $p_k(t)$ . . . . .	94
B.1	Exemplo de antena. . . . .	96
B.2	Antena e círculo de observação. . . . .	97
B.3	Ilustração da posição das componentes do campo elétrico em torno da antena. . . . .	101
B.4	Geometria da antena. . . . .	105
B.5	Função ganho $g(\phi)$ planar de uma antena. . . . .	105
D.1	Representação gráfica da máxima exposição permitida para ambientes controlados. . . . .	110
D.2	Representação gráfica da máxima exposição permitida em função para ambientes não-controlados. . . . .	111

## Lista de Tabelas

6.1	Pesagem dos sujeitos com 10 dias de vida. . . . .	49
6.2	Média dos pesos dos sujeitos com 70 e 100 dias de idade. . . . .	49
6.3	Médias do consumo diário de água e ração dos sujeitos. . . . .	50
6.4	Resultados dos treinos do Labirinto Aquático com a plataforma baixa para os ratos do Grupo Controle com 30, 60 e 90 dias de vida. . . . .	50
6.5	Resultados dos treinos do Labirinto Aquático com a plataforma baixa para os ratos do Grupo Experimental com 30, 60 e 90 dias de vida. . . . .	51
6.6	Resultados dos treinos do Labirinto Aquático com a plataforma alta para os ratos do Grupo Controle com 30, 60 e 90 dias de vida. . . . .	51
6.7	Resultados dos treinos do Labirinto Aquático com a plataforma alta para os ratos do Grupo Experimental com 30, 60 e 90 dias de vida. . . . .	51
6.8	Resultados da 1ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 30 dias de idade. . . . .	56
6.9	Resultados da 1ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 60 dias de idade. . . . .	56
6.10	Resultados da 1ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 90 dias de idade. . . . .	56
6.11	Resultados da 2ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 30 dias de idade. . . . .	57
6.12	Resultados da 2ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 60 dias de idade. . . . .	57
6.13	Resultados da 2ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 90 dias de idade. . . . .	57



6.14	Resultados do teste do Labirinto em Cruz para os sujeitos do grupo controle com 30, 60 e 90 dias de vida. . . . .	65
6.15	Resultados do teste do Labirinto em Cruz para os sujeitos do grupo experimental com 30, 60 e 90 dias de vida. . . . .	65
6.16	Resultados do exercício de nível operante. . . . .	67
6.17	Resultados do treino ao bebedouro. . . . .	68
6.18	Resultados do exercício da modelagem. . . . .	68
6.19	Resultados do exercício da saciação. . . . .	69
6.20	Resultados do intervalo variável. . . . .	69
6.21	Resultados do exercício da extinção. . . . .	70
6.22	Resultados da segunda etapa do exercício da discriminação. . . . .	71
D.1	Máximo nível de exposição permitido para ambientes controlados. . . .	109
D.2	Limites para correntes de radiofrequência induzida e de contato em ambientes controlados. . . . .	109
D.3	Máximo nível de exposição permitido para ambientes não-controlados. .	109
D.4	Limites para correntes de radiofrequência induzida e de contato em ambientes não-controlados. . . . .	109
E.1	SAR máxima medida para diversos modelos de aparelhos celulares da Siemens. . . . .	112
E.2	SAR máxima medida para diversos modelos de aparelhos celulares da Motorola. . . . .	113

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ondas Eletromagnéticas e a Radiação não-Ionizante</b>	<b>3</b>
2.1	Introdução . . . . .	3
2.2	Histórico . . . . .	3
2.3	Normas de Segurança para exposição à RF . . . . .	6
2.4	Radiação de Microondas, ERBs e Telefones Celulares . . . . .	7
2.5	Taxa de Absorção Específica (SAR) . . . . .	11
2.6	Conclusões . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Efeitos da Radiação Eletromagnética (EM)</b>	<b>15</b>
3.1	Introdução . . . . .	15
3.2	Efeitos Biológicos da Radiação Não-Ionizante . . . . .	16
3.3	Efeitos Comportamentais . . . . .	20
3.4	Efeitos Indiretos . . . . .	23
3.5	Conclusões . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Testes para Avaliação Comportamental</b>	<b>26</b>
4.1	Introdução . . . . .	26
4.2	Teste com a Gaiola de Skinner . . . . .	27
4.3	Teste com o Labirinto Elevado em forma de Cruz . . . . .	31
4.4	Teste com o Labirinto Aquático (Tanque de Morris) . . . . .	34
4.5	Análise Estatística Aplicada aos Resultados . . . . .	36

4.6	Conclusões . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Metodologia de Trabalho</b>	<b>38</b>
5.1	Introdução . . . . .	38
5.2	Laboratório . . . . .	39
5.3	Sujeitos Experimentais . . . . .	39
5.4	Amostras e Procedimentos Básicos . . . . .	41
5.5	Fonte Geradora de Microondas . . . . .	42
5.6	Construção dos Diagramas de Irradiação . . . . .	44
5.7	Atividades Laboratoriais Desempenhadas . . . . .	46
5.8	Conclusões . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>48</b>
6.1	Introdução . . . . .	48
6.2	Pesagem e Monitoração do Consumo de Água e Ração . . . . .	48
6.3	Labirinto Aquático . . . . .	50
6.4	Teste do Labirinto Elevado em Forma de Cruz . . . . .	64
6.5	Gaiola de Skinner . . . . .	67
6.6	Conclusões . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>73</b>
7.1	Perspectivas para Trabalhos Futuros . . . . .	77
<b>A</b>	<b>Conceitos Básicos de Estatística</b>	<b>79</b>
A.1	Distribuição de frequência . . . . .	79
A.2	Função Freqüência e Função Distribuição . . . . .	80
A.3	Distribuições Multivariáveis . . . . .	82
A.4	Medidas de Localização e Dispersão . . . . .	83
A.5	Valor Esperado ou Esperança . . . . .	89
A.6	Coefficiente de Correlação . . . . .	90
A.7	Intervalos de Confiança . . . . .	90
A.8	Distribuição de $t$ de Student . . . . .	92

<b>B Teoria Básica de Antenas</b>	<b>95</b>
B.1 Conceitos Básicos . . . . .	95
B.2 Padrões de Irradiação . . . . .	104
<b>C Normas Estabelecidas para a Utilização e Vivissecção de Animais em Pesquisas</b>	<b>106</b>
<b>D Normas Estabelecidas pelo Padrão IEEE C95.1-1991</b>	<b>108</b>
<b>E Valores da SAR para Aparelhos Celulares Convencionais</b>	<b>112</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Em todo mundo, diversos estudos investigam os efeitos da radiação eletromagnética emitida pelos telefones celulares, dando ênfase aos possíveis danos à saúde humana. A realização dessas pesquisas é impulsionada pelo aumento progressivo do uso dos equipamentos por parte da sociedade moderna. Precisar níveis de potência perigosos bem como instituir normas de segurança para a exposição à tal radiação só será possível mediante uma melhor compreensão desses efeitos. Neste sentido, o trabalho em questão tem por objetivo estudar os efeitos comportamentais da radiação de microondas proveniente de equipamentos utilizados no Sistema Móvel Celular (SMC) mediante o desenvolvimento de experimentos em laboratório.

Na literatura já são relatados alguns dos possíveis efeitos em seres vivos vinculados à quantidade de energia absorvida pelo organismo. Dentre outros, há efeitos bioquímicos, hematológicos, oculares e comportamentais, sendo estes últimos o tema central do presente trabalho [1-4]. Nas pesquisas, devido à inviabilidade de realizar experimentos desta natureza em seres humanos, ratos são submetidos à radiação de microondas e as alterações comportamentais são observadas, visando verificar se há alguma relação entre a radiação não ionizante e determinado efeito. Por meio de cálculos, mediante a extrapolação dos resultados observados, pode-se obter os possíveis efeitos que seriam esperados em seres humanos.

Neste estudo, que dá continuidade a trabalhos anteriormente desenvolvidos, é exposto, no Capítulo 2, um breve histórico a respeito das ondas eletromagnéticas, destacando

algumas aplicações e efeitos relatados [5]. Ainda no mesmo capítulo, é feito um estudo sobre a radiação de radiofrequência emitida pelos aparelhos celulares e estações radiobases, as normas de segurança estabelecidas e as grandezas mais comumente usadas na teoria dosimétrica. No Capítulo 3, são abordados os principais efeitos biológicos e comportamentais provenientes da exposição à radiação de microondas, seguidos de uma descrição completa dos testes realizados para avaliação dos efeitos comportamentais, apresentada no Capítulo 4. O Capítulo 5 trata da metodologia utilizada nos testes dando uma visão do local onde os mesmos são executados, dos sujeitos experimentais, dos equipamentos utilizados e das atividades de manutenção e melhoramento laboratoriais. No Capítulo 6, são mostrados os resultados dos experimentos acompanhados das discussões e análises. Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões da pesquisa e as perspectivas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Ondas Eletromagnéticas e a Radiação não-Ionizante

### 2.1 Introdução

A seguir, será exposto um breve histórico sobre a utilização e efeitos das ondas eletromagnéticas, enfatizando a radiação de microondas emitida por ERBs e telefones celulares, bem como o desenvolvimento de normas de segurança para a exposição. Posteriormente, apresentar-se-á das também as medidas mais comumente usadas para avaliar a energia eletromagnética absorvida por seres humanos.

### 2.2 Histórico

A observação dos efeitos das ondas eletromagnéticas é antiga e tem relação com a radiação solar e sua capacidade de provocar aumento de pigmentação da pele e, eventualmente, queimaduras.

Apenas no século XIX, Maxwell observou que a natureza da radiação solar e eletromagnética era a mesma. Neste período também ocorreram os grandes desenvolvimentos na tecnologia elétrica e nas aplicações médicas da eletricidade e magnetismo.

Durante o século XIX, além do aparecimento das fontes de corrente alternadas, impulsionada pela teoria do Eletromagnetismo de Ampère, Gauss, Faraday e Maxwell,

passou-se a fazer uso de eletricidade em aplicações terapêuticas. Dentre os trabalhos de pesquisa nesta área vale ressaltar os de Arsene d'Arsonval e Nikola Tesla, que estudaram os efeitos fisiológicos da corrente alternada e os campos elétricos e magnéticos variantes no tempo. Enquanto o primeiro investigou efeitos como variação da pulsação e estimulação de músculos e nervos, o segundo verificou que campos elétricos poderiam "matar" o bacilo da tuberculose, descoberta anunciada pelos jornais como nova cura para doença [6].

No final do século XIX e início do século XX os estudos sobre a interação da radiação de RF com os sistemas biológicos mereceram destaque. Os possíveis efeitos térmicos da radiação EM não-ionizante, decorrentes do aumento da temperatura induzida, começaram a ser pesquisados por Karl Franz Nagelschmidt no princípio do ano de 1900. Posteriormente, questões acerca da coexistência de efeitos não-térmicos foram levantadas [6,7].

Em 1924, Antonin Gosset, pioneiro na exploração dos efeitos biológicos dos campos de radiofrequência, utilizou ondas curtas para eliminar tumores de plantas, sem causar-lhes dano. Dois anos depois, tais efeitos foram estudados em animais por Joseph Williams Schereschewsky. Já na década de 30, além dos estudos dielétricos em tecidos, outros materiais foram submetidos à faixa de ondas curtas. Em 1946 a *Federal Communications Commission* (FCC) alocou a frequência de 2,45 GHz para utilização na medicina, sendo também usados em fornos de microondas domésticos e unidades de processamento de alimentos [6]. Alguns pontos fundamentais como a profundidade de penetração da energia no tecido e geometria do corpo não foram considerados nestes trabalhos iniciais.

Paralelamente, ao final do século XIX, mais precisamente em 1893, o padre Landell de Moura foi responsável pela primeira transmissão sem fio em São Paulo (Brasil), marcando o início do desenvolvimento das comunicações sem fio no mundo. Infelizmente, na época, seus equipamentos foram destruídos por fanáticos religiosos acusando-o de ter "parte com o demônio" [8,9]. Pouco tempo depois, Hertz demonstrou que as ondas de rádio podiam se propagar em um meio sem fio quando o transmissor e o receptor eram postos a poucos metros de distância um do outro. Com base nesse princípio, o primeiro serviço de comunicação do tipo sem fio foi estabelecido por Marconi Gugli-



elmo [10]. A impotência das comunicações sem fio só foi reconhecida no século XX com a Primeira Guerra Mundial, isto devido ao fato dos cabos submarinos, comumente usados na época para a transmissão telegráfica, serem facilmente sabotados.

A faixa de operação dos sistemas móveis era, no princípio, em torno de 2 MHz. Entretanto, em 1930, a FCC designou a utilização de quatro canais na faixa de frequência de 30 a 40 MHz e, posteriormente, em 1975, após extensas negociações entre as indústrias de telecomunicações e a FCC, uma banda de 40 MHz na faixa de 800 a 900 MHz foi alocada para uso do sistema celular. Em 1978, o primeiro sistema celular entra em teste de campo dando origem assim a uma nova era da história das telecomunicações.

Durante a primeira metade do século passado, a radiofrequência foi amplamente aplicada na ciência, indústria, comunicações, medicina e defesa nacional, e, aos poucos, no cotidiano das pessoas, diversas fontes emissoras de radiação estavam presentes. No tocante ao sistema celular, a década de noventa registrou um crescimento de 150% apenas no Brasil e em torno de 60% a nível mundial [10].

A repercussão mundial dos efeitos das ondas eletromagnéticas emitidas pelos aparelhos celulares em seres humanos ocorreu nos EUA nos primeiros anos da década de 90. Nesta época, a partir de um processo movido contra o fabricante do aparelho celular e a operadora, levou-se à tona a discussão sobre o câncer no cérebro como consequência do uso prolongado do aparelho. Desde então, a polêmica tem-se prolongado e muitos outros efeitos têm sido divulgados pela imprensa, aumentando assim o interesse, tanto da comunidade científica quanto da população em geral, sobre a questão.

No final do século passado, devido ao aparelho celular ser usado muito próximo à cabeça, estudos de controle e coorte foram realizados a fim de investigar a relação entre a utilização do telefone e o aparecimento de tumores no cérebro, cabeça e pescoço. Apesar de tais estudos não evidenciarem o aumento destas doenças em usuários do telefone celular, seus autores advertiram para que esses resultados negativos fossem vistos com cautela, pois ainda não se conhece os possíveis efeitos da exposição crônica e por um período de tempo mais prolongado às ondas eletromagnéticas não-ionizantes sobre os seres humanos [4, 11]

## 2.3 Normas de Segurança para exposição à RF

Diante da presença constante de fontes emissoras da radiação de RF no dia a dia da população e do desenvolvimento de fontes mais poderosas, pesquisas sobre a interação entre a energia de radiofrequência e os sistemas biológicos foram realizados por médicos e cientistas para investigar os possíveis riscos à saúde causados por estas radiações [6, 12]. Esses fatos evidenciavam a necessidade cada vez maior do estabelecimento de padrões de segurança.

O primeiro passo neste sentido foi dado pela Força Aérea e pela Marinha Americana em 1953, quando impulsionados pela Guerra Fria, o desenvolvimento de redes de radares fez emergir questões associadas aos perigos da exposição à energia de radiofrequência gerada por seus transmissores [5, 6]. Neste mesmo ano, Herman Schwan, fundamentado em cálculos de engenheiros e biofísicos, propôs um limite de exposição seguro  $10 \text{ mW/cm}^2$ .

O Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD) iniciou, no ano seguinte, um programa custeando pesquisas sobre os efeitos da radiação radiofrequência (RF) e patrocinando laboratórios governamentais e universidades nacionais [6]. No período entre 1957 a 1960 os resultados destas pesquisas foram expostos em uma série de simpósios nos quais se demonstrou a origem térmica da grande parte dos efeitos.

Em 1960 a Associação de Padrões Americanos aprovou a criação de Padrões para a Radiação de Risco com a co-responsabilidade do Departamento da Marinha e do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) [13]. Seis anos depois o ANSI C95-1966, primeiro padrão desenvolvido, estabeleceu como limite para exposição segura o valor de  $10 \text{ mW/cm}^2$ , sendo este valor submetido a revisões a cada período de cinco anos.

No intuito de continuar protegendo os trabalhadores e a população em geral dos riscos da exposição à radiação RF, o *American National Standards Institute* (ANSI), o IEEE e outras organizações nacionais e internacionais têm publicado normas para limitar a exposição. Segundo as normas, a exposição em níveis inferiores ou iguais aos recomendados é considerada segura para seres humanos [14, 15].

Uma norma muito utilizada foi a IEEE C-95.1.1991, elaborada pelo IEEE em 1992.

Ela determinou as condições de exposição associadas a ambientes controlados, incluindo locais cujas pessoas estão cientes do perigo e dos níveis de exposição, como trabalhadores da área ou indivíduos que necessitem entrar em áreas onde estejam sendo efetuadas medições, e a ambientes não controlados, nos quais o público não tem conhecimento ou controle sobre sua exposição [16].

Outro aspecto importante a ser ressaltado são as contínuas modificações das normas de exposição à RF. Isto se deve à significativa diferença entre o crescente desenvolvimento e popularização dos aparelhos celulares e o tempo necessário à maturação confiável das pesquisas e à divulgação dos seus resultados, ou seja, enquanto a tecnologia celular evolui num certo espaço de tempo, os efeitos para seus usuários ou são conhecidos simultaneamente ou após sua perigosa e extensiva utilização.

## 2.4 Radiação de Microondas, ERBs e Telefones Celulares

Em física, o termo “Radiação” refere-se usualmente a partículas e campos que se propagam, transferindo energia, no espaço (preenchido ou não por matéria) [17].

A radiação eletromagnética é constituída pela variação de campos elétricos e magnéticos no espaço e tempo. Ela é caracterizada pela amplitude e frequência (Hz), ou alternativamente, pelo comprimento de onda  $\lambda$  (m) da oscilação. Sua velocidade de propagação num dado meio é sempre constante, atingindo seu valor máximo no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s). As ondas de rádio, a luz visível, os raios X e Gama, os raios infravermelhos e ultravioletas são exemplos de radiação eletromagnética [4, 17, 18].

As ondas eletromagnéticas de radiofrequência fazem parte do espectro eletromagnético da energia de microondas que não especifica perfeitamente uma faixa do espectro de radiofrequência, mas corresponde aproximadamente à faixa *Ultra High Frequencies* (UHF) (300 a 3000 MHz) em conjunto com a faixa *Super High Frequencies* (SHF) (3 a 30 GHz) [19].

A radiação de microondas é um tipo de radiação eletromagnética não-ionizante. Tal denominação está relacionada ao fato desta radiação, apesar de poder excitar os

átomos e levar os elétrons a camadas mais externas, não ser capaz de ionizar átomos ou moléculas, uma vez que a energia necessária para tanto é de aproximadamente 10 elétron-volt (eV) e a energia da radiação RF é cerca de mil vezes menor que 1 eV (1 eV é a energia igual ao trabalho necessário para deslocar uma única carga elementar 'e' através de uma diferença de potencial de 1 volt (V)) [9,17,20].

Radiações com frequências iguais ou superiores a  $10^{15}$  Hz, como a radiação ultravioleta e Raio X, são consideradas radiações ionizantes e acarretam danos aos tecidos biológicos, mesmo a baixas intensidades. A radiação eletromagnética não-ionizante, entretanto é considerada inofensiva a intensidades muito baixas, embora possa ser perigosa a intensidades mais altas .

Além das fontes emissoras de radiação RF mais presentes em nosso cotidiano, incluindo antenas de rádio, televisão, *paging* e fornos de microondas, o aparelho celular e as estações radiobase (ERBs), que também constituem fontes de emissão, se incorporaram ao dia a dia das pessoas, alterando seus comportamentos e transformando a paisagem urbana com a presença de antenas e torres [6]. Adicionalmente, têm-se as comunicações móveis via satélite, os telefones sem fio, as redes de computadores e diversas aplicações *wireless*.

Mesmo não havendo um consenso da comunidade científica quanto aos perigos dessa radiação para os seres humanos, dentre os diversos efeitos relatados pela população em geral pode-se destacar: tonturas, perturbações no sono, dores de cabeça, desordem no sangue, problemas cardiovasculares, danos ao sistema nervoso, catarata, diminuição da eficiência do sistema imunológico, esterilidade temporária em homens e alguns efeitos comportamentais como perda de memória e aumento do nível de estresse [1-3]. Destacam-se também um aumento da temperatura da face exposta ao aparelho celular, queimaduras devido ao contato com antenas desencapadas e outros efeitos biológicos, culminando com alguns tipos de câncer. Por fim é válido ressaltar problemas relacionados à compatibilidade eletromagnética (habilidade de sistemas elétricos e eletrônicos para operarem em ambientes sem efeitos eletromagnéticos adversos) provocando interferências em equipamentos eletrônicos como marca-passos, balanças, equipamentos biomédicos e a desmagnetização de cartões eletrônicos.

Tanto no caso dos aparelhos portáteis como das ERBs, os níveis de exposição de-

caem com o aumento da distância da fonte. Para os telefones, a exposição se dá principalmente do lado da cabeça, quando uma ligação está em curso, ou em partes do corpo próximas ao aparelho, quando o mesmo está ligado mas nenhuma ligação está sendo efetuada. Para às ERBs apesar de a exposição ocorrer em todo corpo e da potência de operação ser considerável, como a potência decai com a distância na forma  $d^\alpha$  em que  $\alpha$  é um fator de atenuação dentro do intervalo  $2 \leq \alpha \leq 4$ , os níveis de exposição, para o público em geral, próximo a ERBs típicas estão bem abaixo dos limites recomendados pelas normas [14,15]. Organizações reconhecidas como o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), o *American National Standards Institute* (ANSI), a *International Radiation Protection Association* (IRPA) e o *National Council on Radiation Protection* (NCRP) estabeleceram limites para sítios de células típicas variando entre 2,75 a 2,97 mW/cm<sup>2</sup> para exposição ocupacional e entre 0,41 e 0,45 mW/cm<sup>2</sup> para exposição da população em geral a frequências de celular de 825 a 890 MHz [15].

Adicionalmente as antenas geralmente estão localizadas em lugares elevados, em altitudes variando entre 30 a 75 m. A altura das mesmas é fundamental pois elas devem ser altas o suficiente para cobrir toda a célula e baixa o bastante a fim de não provocar interferência em células distantes. Por conveniência, em certos casos, coloca-se a antena ao lado ou sobre estruturas como edifícios ou tanques de água.

É necessário adicionar continuamente novas células em muitas áreas metropolitanas e seus subúrbios com o objetivo de permanecer atendendo à demanda por canais de rádio disponíveis e garantir a qualidade do serviço. A instalação das antenas nas ERBs geralmente provoca um certo receio na população, principalmente nas pessoas que trabalham ou moram nas vizinhanças dessas antenas, a respeito da segurança quanto à exposição aos campos eletromagnéticos emitidos por esses equipamentos. Tem-se ainda o impacto ambiental devido ao visual das torres e antenas. A FCC autoriza até duas companhias de telefones celulares em cada área de serviço, porém permite uma potência radiada efetiva (ERP), de acordo com a altura da torre e a área geográfica, de até 500 W por canal. Com a expansão do sistema e a subdivisão das células, a potência do transmissor é reduzida no intuito de evitar interferências em células distantes. Em áreas urbanas e suburbanas, a maioria dos sítios de células operam com ERP de no

máximo 100 W por canal, já nas grandes cidades, onde as células são menores, a ERP é quase sempre inferior a 10 W por canal, e por fim em edifícios e estações de trem, os transmissores associados às microcélulas operam com ERP de 1 W.

Segundo medições realizadas em antenas localizadas no teto de prédios, apenas em determinadas áreas do teto, dependendo da proximidade da antena, a exposição é superior aos limites permitidos e o acesso a estas áreas normalmente é restrito [15]. Diante disto, a radiação emitida pelas ERBs não é diferente dos campos eletromagnéticos de estações de rádio ou televisão comuns, sendo consideradas fontes de menor risco. É, entretanto, sobre os aparelhos celulares que recai a maior polêmica.

O aparelho celular portátil dos sistemas analógicos opera a uma potência de 600 mW e alguns aparelhos dos sistemas digitais operam com mais de 600 mW nominal [15]. Para o sistema GSM utilizado no Reino Unido e na Europa tem-se aparelho funcionando com 1 W de potência na frequência de 1900 MHz e até 2 W para 900 MHz. Adicionalmente, eles são quase sempre utilizados colados ou no máximo a uma distância de 3 a 4 cm da cabeça. Os manuais de uso destes equipamentos não fazem muitas referências ao fato deles operarem na faixa de microondas e alguns desses manuais aconselham os usuários a manterem o aparelho a uma distância superior a 30 cm de qualquer parte do corpo, como se isto fosse possível.

Devido ao fato dos telefones celulares serem usados bem perto da cabeça, tem-se então a situação de campo próximo cujo comportamento do campo eletromagnético é mais complicado de se determinar. Neste caso, a maior parte da energia fica concentrada nas vizinhanças da antena, enquanto outra parte flui de um lado para o outro ao longo do seu comprimento e só uma pequena porção é irradiada radialmente. Tem-se também a dificuldade de reproduzir experimentalmente a situação real enfrentada pelo usuário a fim de se obter resultados confiáveis.

Na avaliação sobre os possíveis efeitos em relação à saúde, a não homogeneidade genética da população como também a diferente suscetibilidade dos indivíduos aos riscos ambientais devem ser considerados. A predisposição genética de alguns grupos, sensíveis a doenças ou apresentando problemas relacionados à idade, é exemplificado na literatura. Com isto, embora os órgãos responsáveis pelo estabelecimento das normas de exposição à radiação de microondas estejam diminuindo constantemente os limites

de radiação aceitáveis, não se pode afirmar que esta exposição, mesmo abaixo dos níveis recomendados, não provoca dano à saúde. Tais lacunas no conhecimento são suficientes para justificar precauções, até que sejam obtidas informações científicas mais consistentes.

Dentre as precauções a serem adotadas destacam-se:

- Diminuição do uso do aparelho celular colado ao ouvido, posicionando a antena de forma a evitar o contato com a cabeça.
- Procurar não falar com a antena recolhida, dentro de automóveis ou edificações, situações em que o telefone celular emite maior potência para se comunicar com a antena mais próxima.

## 2.5 Taxa de Absorção Específica (SAR)

A teoria dosimétrica, isto é, cálculo da energia eletromagnética absorvida por seres humanos expostos à radiação, tem se tornado cada vez mais importante devido ao grande aumento no uso de equipamentos eletromagnéticos na sociedade e os possíveis riscos provenientes da radiação.

Os níveis permitidos de exposição à radiação de RF podem ser expressos em termos da densidade de potência ( $mW/cm^2$ ) associada aos campos elétrico e magnético ( $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ ) e às correntes de contato ou induzida, ou também em termos da taxa de absorção específica (SAR), parâmetro também comumente utilizado.

A SAR representa a taxa no tempo, no qual a energia eletromagnética de RF é fornecida a um elemento de massa de um indivíduo, ou seja, a potência absorvida por unidade de massa [13]. Ela pode ser aplicada para qualquer tecido ou órgão de interesse ou dada em termos de uma média para o corpo todo como estabelecido pelo ANSI C95.1-1982 [16]. A SAR pode ser expressa analiticamente pela Equação 2.1

$$SAR = \frac{d}{dt} \frac{dW}{dm} = \frac{d}{dt} \frac{dW}{\rho dV} \text{ (mW/g)}. \quad (2.1)$$

Sendo definida como a derivada no tempo do aumento de energia  $dW$  absorvida ou

dissipada em um elemento de massa  $dm$  contida em um elemento de volume  $dV$ , cuja massa específica é  $\rho$ .

A SAR pode ainda ser dada em função do campo elétrico em um ponto específico ou como função do aumento da temperatura em um ponto, respectivamente,

$$\text{SAR} = \frac{\sigma |E^2|}{\rho} \text{ e } \text{SAR} = \frac{c\Delta T}{\Delta t} \quad (2.2)$$

em que,  $\sigma$  é a condutividade do tecido (S/m),  $\rho$  é a densidade do tecido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $E$  é o valor RMS da intensidade do campo elétrico (V/m),  $\Delta T$  é a variação na temperatura em ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\Delta t$  é o tempo de exposição à radiação (s) e  $c$  é a capacidade de calor específica  $\text{JKg}^{-1}\text{C}^{-1}$  [13].

As condições de exposição estabelecidas pela norma ANSI-IEEE C95.1 para o público em geral em ambientes não controlados limitam a SAR média para o corpo todo em  $0.08 \text{ mW/g}$  e o valor máximo da SAR para  $1 \text{ g}$  de qualquer tecido em  $1,6 \text{ mW/g}$ . Já para ambientes controlados os valores são  $0,4 \text{ mW/g}$  e  $8 \text{ mW/g}$  respectivamente. Em termos da densidade de potência, o limite de exposição permitido para frequências no intervalo de  $300\text{-}3.000 \text{ MHz}$  é  $f/1.500 \text{ (mW/cm}^2\text{)}$  para ambientes não-controlados e  $f/300 \text{ (mW/cm}^2\text{)}$  para ambientes controlados, cinco vezes maior que os estimados para ambientes não controlados [16]. Assim, para a frequência de  $850 \text{ MHz}$  o valor de densidade de potência obtido é  $0,57 \text{ mW/cm}^2$  para ambientes não-controlados e  $2,84 \text{ mW/cm}^2$  para ambientes controlados.

Na pesquisa, a fim de verificar possíveis danos à saúde, animais são irradiados e os efeitos observados são inferidos, por meio de cálculos dosimétricos, para os previstos em seres humanos. Curvas da SAR em função da frequência para um rato de tamanho médio  $0,2 \text{ m}$  e um homem de estatura mediana  $1,75 \text{ m}$  são mostradas na Figura 2.1 a seguir [21]. Observando as curvas nota-se que, devido à SAR para seres humanos estar uma ordem de grandeza abaixo da SAR para os ratos, os efeitos obtidos para os animais em uma determinada densidade de potência só poderão ser verificados no homem para valores de densidade de potência superiores.

As curvas representadas na Figura B.1 permitem extrapolar por analogia os resultados obtidos com os ratos para os possíveis resultados esperados em seres humanos. A fim de determinar a SAR local equivalente, deve-se igualar as razões entre os com-



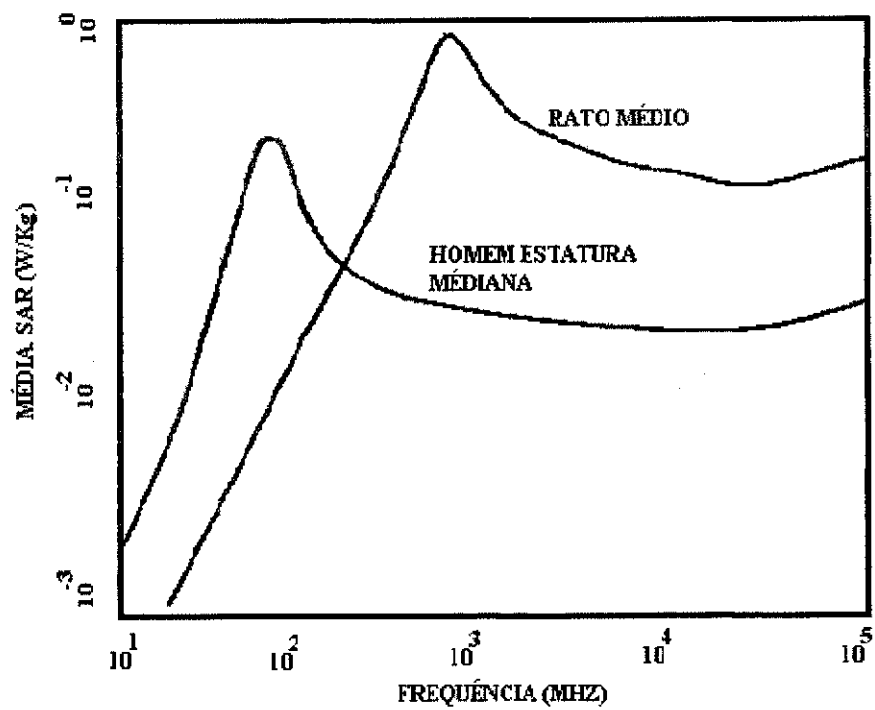


Figura 2.1: Curva da SAR em função da frequência para um rato médio e um homem de estatura mediana.

primento de onda ( $\lambda = v/f$  com  $v = 3 \times 10^8$  m/s para o espaço livre) e as maiores dimensões ( $l$ ) de ambos os seres envolvidos. Logo,

$$\frac{\lambda_{rato}}{l_{rato}} = \frac{\lambda_{homem}}{l_{homem}}. \quad (2.3)$$

Para um melhor entendimento deste cálculo, considere que um determinado efeito foi verificado em ratos médios submetidos à densidade de potência de  $0,6$  mW/cm<sup>2</sup>, na frequência de  $850$  MHz, frequência na qual operam aos aparelhos celulares no Brasil atualmente e deseja-se saber a densidade de potência necessária para produzir a mesma SAR em seres humanos de estatura mediana. Utilizando a Equação 2.3, para  $850$  MHz, tem-se  $\lambda_{rato} = 0,35$  m, sendo  $l_{rato} = 0,2$  m e  $l_{homem} = 1,75$  m, obtem-se  $\lambda_{homem} = 3,06$  m, correspondendo a uma frequência de  $98,04$  MHz. Mediante as curvas, em  $850$  MHz, a SAR para o rato é  $0,6$  W/kg para  $1$  mW/cm<sup>2</sup> e conseqüentemente, de  $0,36$  W/kg para  $0,6$  mW/cm<sup>2</sup>. Ainda segundo os gráficos, a SAR média para o homem em  $98$  MHz é de aproximadamente  $0,027$  W/kg para  $1$  mW/cm<sup>2</sup>, logo, para produzir  $0,36$  W/kg no homem será necessária uma densidade de potência de  $13,33$  mW/cm<sup>2</sup>. Desta forma, se o efeito observado no rato está diretamente relacionado à SAR, um efeito similar no homem deverá ocorrer em uma frequência de  $98$  MHz, com uma densidade de potência incidente de  $13,33$  mW/cm<sup>2</sup>.

## 2.6 Conclusões

Este capítulo abordou tópicos introdutórios muito importantes para um melhor entendimento do presente estudo. Além de apresentar um histórico a respeito da radiação eletromagnética, desde o primeiro trabalho sobre os seus efeitos, culminando com os possíveis danos acarretados pela radiação proveniente dos aparelhos celulares, amplamente usados pela sociedade moderna, ele mostrou o desenvolvimento de padrões para limitar a exposição à radiofrequência assim como destacou as grandezas comumente utilizadas pela teoria dosimétrica.

# Capítulo 3

## Efeitos da Radiação Eletromagnética (EM)

### 3.1 Introdução

A preocupação da comunidade científica, de autoridades e do público em geral sobre a interação da radiação de RF dos aparelhos celulares com os seres humanos é constante.

No início dos anos 80 surgiram as primeiras reportagens relatando os possíveis riscos provenientes dos campos eletromagnéticos. Estas reportagens destacaram os campos de baixa frequência nas casas e sob linhas de alta-tensão, enquanto estudos epidemiológicos exigiam a observação de correlações estatísticas [6].

Ainda não há uma comprovação em relação ao fato da radiação de microondas dos celulares apresentarem um risco significativo à saúde que, segundo a definição da OMS, deve ser entendida como o completo estado físico, mental e social, não se restringindo apenas à ausência de doenças e enfermidades. Neste sentido, diversas pesquisas sobre os perigos dos campos eletromagnéticos em sistemas biológicos incluindo moléculas, células, organismos, animais e até seres humanos, têm sido continuamente realizados. Os efeitos no sistema nervoso, no metabolismo do sistema cardiovascular, em fatores hereditários e no sistema imunológico já foram estudados, porém os resultados são muito contraditórios.

Há ainda trabalhos a respeito dos efeitos comportamentais relacionados ao nível de

estresse e à aprendizagem de animais submetidos à radiação de RF, tema central desta pesquisa, e também sobre os efeitos indiretos resultantes dela.

## 3.2 Efeitos Biológicos da Radiação Não-Ionizante

Os efeitos biológicos decorrentes da exposição às radiações de RF podem ser, genericamente, divididos em efeitos térmicos e não-térmicos [3].

Os efeitos térmicos, os mais amplamente compreendidos e conhecidos efeitos resultantes dos campos eletromagnéticos, são aqueles causados pela elevação da temperatura dos tecidos biológicos proveniente da absorção de energia dos campos elétricos no meio dissipativo. Dependendo da frequência, as radiações de RF e de microondas são absorvidas não só pela pele mas também por camadas mais profundas de tecidos. Porém, estando os sensores de temperatura do corpo localizados apenas na pele, aquecimentos significativos em regiões mais profundas poderão ocorrer sem serem percebidas, podendo prejudicar os tecidos [3].

Na literatura, os efeitos térmicos mais comumente mencionados são o aquecimento da temperatura da face próxima ao aparelho celular, cefaléia, queimaduras causadas pelo contato com antenas desencapadas, perturbações no sono, esterilidade, entre outros [3, 4].

No intuito de verificar o aquecimento da cabeça devido à exposição aos telefones celulares, diversos estudos simulando e avaliando a distribuição da SAR na cabeça vêm sendo realizados [22–24]. Um trabalho interessante, recentemente publicado, mostra os efeitos do tamanho da cabeça nas características da SAR visando detectar se havia diferenças na energia EM absorvida pelas cabeças de crianças e adultos submetidos à radiação de telefones móveis na frequência de 835 MHz com uma potência de 600 mW. Os resultados fornecidos pelos experimentos indicam um aumento da SAR média e, de um modo geral, uma diminuição da SAR local em cabeças de tamanhos menores, indicando uma distribuição mais homogênea da radiação em crianças. Para cabeças com tamanhos maiores, verificou-se uma redução da SAR média e uma distribuição bastante irregular da energia, com valores da SAR bastante elevados no lado da cabeça próximo ao telefone e valores muito pequenos da SAR no lado oposto [25].

Uma grande parte dos estudos concentrou-se em pesquisar os efeitos da radiação sobre os olhos, isto porque o cristalino do olho é potencialmente sensível à radiação de RF pois possui uma menor capacidade de dissipar calor. Estudos conduzidos com o objetivo de verificar o aparecimento de catarata induzida pela radiação de microondas concluíram que são necessários altos níveis de exposição por pelo menos uma hora para causar a doença [26]. Alterações degenerativas têm sido relatadas em vários tecidos de olhos de animais após serem submetidos a campos de RF com frequências de 1-3 GHz. Alguns estudos utilizando macacos verificaram lesões no endotélio das córneas e um aumento do vazamento vascular na íris [27,28] e pesquisas mais recentes apontaram uma ligeira acentuação das respostas elétricas na retina de macacos expostos a campos de 1,25 GHz, porém não foram detectadas modificações estruturais [29].

Devido ao uso contínuo dos telefones celulares colados à orelha, recomendou-se a realização de pesquisas para investigar os possíveis efeitos dos campos de RF na parte interna da orelha e na audição dos usuários. Vários projetos foram iniciados na França, Alemanha e Itália visando investigar as estruturas e funções nas partes medianas e internas da orelha após a exposição à radiação das comunicações sem fio. Exames feitos na parte interna da orelha de ratos, em fase preliminar, esperam a conclusão dos experimentos, ainda inacabados, para um melhor esclarecimento do assunto [30].

Devido à sua reconhecida sensibilidade ao calor, outro órgão submetido extensamente à avaliação histológica e funcional após sofrer a radiação de microondas é o testículo [4,31]. Trabalhos realizados por Khillare e Behari (1998) indicaram uma diminuição na fertilidade dos machos e alterações nos túbulos seminíferos em sujeitos submetidos a uma exposição prolongada a campos de 200 MHz com SAR na faixa de 2 mW/kg, confirmando os resultados das pesquisas de Magras e Xenus (1997) em ratos submetidos a níveis muito baixos de radiação nas imediações da antena [32,33].

Na Divisão de Efeitos Biológicos do LABCOM, os estudos nos testículos tiveram início com Mohit Gheyi, que verificou uma diminuição no número de filhotes e alterações microscópicas nos ovários e testículos de ratos da espécie *Rattus norvegicus* submetidos à radiação de microondas em 2,45 GHz ( $S=1,6 \text{ mW/cm}^2$ ) [5]. Tais resultados impulsionaram a realização de uma pesquisa profunda pela médica patologista Rosalina Rosas, executando avaliações histológicas em testículos de ratos impúberes

e adultos expostos a campos de RF em 850 MHz ( $S=1,6 \text{ mW/cm}^2$ ). As análises não conduziram a modificações histológicas ou estruturais nos testículos dos animais bem como não detectaram diferenças morfológicas significativas entre os órgãos de ratos impúberes e adultos submetidos à radiação [4].

Com relação à influência da radiação não-ionizante sobre o sistema cardiovascular, segundo estudos desenvolvidos, não foram detectadas alterações nos batimentos cardíacos ou pressão sanguínea em animais [34–36].

Pesquisas visando detectar possíveis sinais relacionados com efeitos térmicos em grupos de seres humanos expostos ou isentos da radiação celular relatam, dependendo da intensidade e duração da exposição, a presença de sintomas como garganta seca, ondas de calor, irritabilidade, elevação da viscosidade sanguínea, diminuição da frequência cardíaca, dentre outros, nos indivíduos irradiados [4].

Os efeitos não-térmicos estão relacionados aos efeitos bioquímicos ou eletrofísicos provenientes da ação direta dos campos eletromagnéticos induzidos e não vinculados com a elevação da temperatura. Embora os resultados relacionados aos efeitos não-térmicos sejam muito contraditórios e inconclusivos, foram relatados na literatura efeitos sobre o sistema nervoso e imunológico, em fatores hereditários, e no metabolismo [3, 15, 37].

Como exemplo dos efeitos não térmicos tem-se: alterações na síntese do Ácido Desoxirribonucléico (DNA) e transcrição do Ácido Ribonucléico (RNA), alterações no fluxo de íons através das membranas celulares (principalmente das células nervosas), movimentação dos íons de cálcio nos tecidos do cérebro, alterações na passagem de substâncias através da barreira sangue-cérebro e o desenvolvimento de tumores, especialmente no cérebro [3, 6, 37, 38].

Um efeito que tem atraído uma atenção especial são as alterações na permissão da passagem de substâncias através da barreira sangue-cérebro, induzidas pela radiação de microondas a níveis de exposição extremamente baixos.

A barreira sangue-cérebro é um complexo anatômico/fisiológico associado ao sistema vascular. Ela é um sistema de defesa natural, funcionando como um filtro seletivo permitindo a passagem de substâncias do sangue para o cérebro. Enquanto a barreira proíbe a infiltração de toxinas no cérebro, agentes e drogas eficazes no tratamento de

doenças em outras partes do corpo podem não entrar no cérebro. Assim, a abertura não intencional desta barreira sujeita o sistema nervoso ao ataque de antígenos, por outro lado, a sua capacidade de abertura seletiva possibilita usar microondas para combater infecções ou facilitar a quimioterapia em tumores cerebrais [38].

Alguns trabalhos realizados verificaram um aumento da permeabilidade da barreira sangue-cérebro para proteínas após a exposição a radiação de RF para uma SAR de 0,016 W/kg, porém outros estudos não confirmaram tais resultados [38-40]. Uma outra importante pesquisa realizada relata o efeito seletivo da radiação de microondas no cérebro de ratos anestesiados para o transporte através barreira sangue-cérebro de *methotrexate* (MTX), uma droga amplamente prescrita em quimioterapia para uma série de neoplasias. Os resultados dos testes indicaram um aumento significativo da quantidade de MTX, droga normalmente excluída pelo cérebro, em cérebros de ratos submetidos ao tratamento seletivo com microondas, como também uma reversão deste efeito nos 45 minutos pós-irradiação [38, 41].

Dentre os efeitos biológicos, certamente um dos que causa mais polêmica e receio por parte da população é o desenvolvimento de tumores, principalmente no cérebro, e a hipótese de incidência de câncer. Neste sentido, diversos estudos do sistema nervoso central têm sido realizados a fim de elucidar esta questão.

Tynes et al (1996) desenvolveu na Noruega um estudo de coorte em mulheres operadoras de sistemas telegráficos e de rádio, cujo resultado apontou um risco relativo de câncer de mama [42]. Entretanto, a ausência da conexão com a radiação de RF tornou-se evidente em um grande estudo de controle sobre casos de câncer de mama em mulheres nos EUA utilizando informações obtidas mediante certificados de morte [43], ou em pesquisas de coorte avaliando incidências de câncer no sistema nervoso e cérebro de trabalhadores na área de projetos, produção e testes em aparelhos sem fio [44]. Um ponto a ser ressaltado é que grande parte dos trabalhos não forneceram informações a respeito do emprego e da exposição à radiação dos telefones. Outras contradições presentes neste tipo de pesquisa são a variedade nos níveis de exposição usados nos trabalhos, estando alguns deles dissociados dos níveis usados na tecnologia celular, e também a aplicação de metodologias deficientes.

Diversos estudos epidemiológicos recentes indicaram que o uso do telefone celular

não causa tumores a curto prazo, não sendo capazes, contudo, de precisar os riscos de câncer ou tumores cerebrais para períodos de latência mais longos e para tumores de crescimento lento, cujos sintomas podem levar décadas para emergirem em seres humanos. Por esta razão, pesquisas a longo prazo com modelos animais são decisivas [38].

Essas evidências foram reforçadas por um trabalho publicado no *Journal of the Cancer Institute*, do dia 07 de fevereiro de 2001. Pesquisadores coordenados pelo Dr. Christoffer Johansen, da sociedade de câncer de Danish, em Copenhagen (Dinamarca), identificaram 420.095 usuários de aparelhos celulares por meio do registro de duas empresas telefônicas e cruzaram os nomes com as informações e dados do Registro Dinamarquês de Câncer. A incidência de tumores cerebrais e nas glândulas salivares e também leucemia não estava aumentada no grupo de usuários de celulares. Além disso, o tempo de uso do aparelho, a idade de início e da utilização assim como o tipo de equipamento não surtiu nenhum efeito no risco de câncer. Adicionalmente, nos pacientes portadores de tumores no sistema nervoso central, o sub-tipo e a localização anatômica do tumor não estavam relacionados ao uso do celular. Esses dados estão de acordo com os resultados de dois estudos americanos e são contrários a um estudo Sueco, todos publicados no final do ano 2000 [45].

Em todo o mundo, as pesquisas continuam sendo desenvolvidas e em maio de 2001 foi iniciado um estudo pelo Programa Nacional de Toxicologia dos EUA (NTP), no Parque de Triângulo de Pesquisa com duração de cinco anos, concentrando-se em esclarecer a relação entre a radiação de microondas dos telefones celulares e o câncer.

### **3.3 Efeitos Comportamentais**

Paralelamente aos estudos sobre possíveis efeitos biológicos da radiação de RF dos aparelhos celulares, também têm sido realizadas pesquisas com o objetivo de avaliar efeitos comportamentais. Dentre estes efeitos, os mais comumente citados na literatura são o aumento do nível de estresse, dificuldade no aprendizado e diminuição na capacidade de memorização [1-3, 46]. Muitos trabalhos destinam-se a observar os efeitos sobre o aprendizado e memorização no cumprimento de tarefas pré-estabelecidas e ainda o nível de estresse em animais [5, 12]. A ocorrência de tais comportamentais depende da



densidade de potência utilizada, duração e outros fatores da exposição à radiação aplicada no decorrer dos testes, podendo também estar relacionada às alterações térmicas do corpo, uma vez que o aquecimento causa um efeito de enfraquecimento generalizado ou diminuição da motivação pelo alimento, alterando assim o desempenho dos animais.

Um efeito interessante e bem estabelecido em animais e humanos é a sensação auditiva induzida por microondas, também chamado “fenômeno auditivo das microondas” ou “efeitos audíveis das microondas”. O fenômeno consiste na audição, pelos humanos e animais em laboratório, de pulsos curtos da radiação de microondas modulada em altos picos de potência e está baseado na Teoria Termoelástica das Microondas, induzindo ondas de pressão acústicas na cabeça. Pelo fato desses pulsos serem acusticamente perceptíveis e servirem como discriminadores estão sendo amplamente utilizados em diversos estudos comportamentais [30].

Chou et al (1985) estabeleceu 1 mJ/kg como o limiar da audição em ratos para pulsos de microondas com duração de aproximadamente 35  $\mu$ s (com um pico de SAR de 30 W/kg) [47]. Posteriormente, diversos testes realizados com ratos, gatos e guinéus demonstraram a obtenção de respostas auditivas por meio de pulsos de microondas e a semelhança dessas respostas com as provenientes de pulsos acústicos convencionais [30].

Apesar do consenso em relação às sensações auditivas da exposição a campos pulsados de RF na produção de alterações comportamentais em animais (os quais possivelmente sentem-se ligeiramente estressados por escutarem o pulso de microondas), este fenômeno não tem sido explorado usando as condições estabelecidas pela tecnologia celular, utilizando algumas vezes uma SAR limite de 1,6 kW/kg, cerca de 1000 vezes mais alto que o permitido pelas regras da FCC para os telefones móveis celulares [30]. Desta forma faz-se necessário investigar a fundo uma possível associação entre os campos gerados pelos telefones celulares e as alterações comportamentais nos seres vivos.

Pesquisas analisando a atividade motora em animais submetidos à exposição a longo prazo da radiação de RF também são frequentemente executadas para avaliar o nível das atividades cerebrais e o mecanismo termo-regulador de animais pois, a fim de reduzir o aquecimento corporal provocado pela radiação, alguns animais reduzem sua atividade motora. Neste sentido, Mitchell et al (1988) expôs ratos à radiação de

microondas na frequência de 2,45 GHz por sete horas para uma SAR de 2,7 W/kg ( $S \approx 12 \text{ mW/cm}^2$ ), verificando, nos ratos do grupo experimental comparados ao de controle, não só uma diminuição da atividade locomotora como uma redução na sensibilidade a novos estímulos acústicos [48].

A fim de avaliar a taxa de aprendizagem e memorização são aplicadas diversas técnicas para o desenvolvimento de tarefas, altamente qualificadas e padronizadas. Para detectar modificações no aprendizado, técnicas de nível operante como pressionamento de alavancas após estímulos visuais ou auditivos são bastante usadas. Já os experimentos de memória espacial são comumente executados em labirintos aquáticos ou com braços radiais, no qual tanto o cumprimento de tarefas específicas assim como o tempo gasto para isto são registrados. As experiências de análise comportamental devem ser rigorosamente estruturadas e acompanhadas, devendo-se considerar a influência de fatores como frequência do campo aplicado, temperatura e umidade relativa do ambiente e tamanhos e espécies dos sujeitos testados na análise dos resultados obtidos.

Os estudos realizados nesta área forneceram resultados um tanto contraditórios, conforme verifica-se em dois estudos recentes. Wang e Lai (2000), por meio de testes com o labirinto aquático relataram alterações na memória espacial de ratos, os quais tinham de aprender a escapar da água nadando até uma plataforma submersa não visível pelos animais. Para os ratos machos, expostos durante três dias em duas sessões de sessenta minutos a campos pulsados de 2,45 GHz (com pulsos de largura 2  $\mu\text{s}$ ) e uma SAR de corpo inteiro de 1,2 W/kg, verificou-se uma deficiência por parte dos sujeitos experimentais para localizar a plataforma submersa, levando mais tempo para desempenhar a tarefa [49]. Neste trabalho é válido ressaltar o uso de pulsos de microondas com níveis excedendo o limiar da audição de microondas para ratos, podendo vir a causar um estresse nos animais e possíveis mudanças no comportamento. Pesquisas executadas por Sienkiewicz (2000) usando camundongos para localizar o alimento ao final dos braços de um labirinto com oito braços radiais, não detectou variações comportamentais significativas dos animais do grupo experimental comparado ao de controle. Os ratos foram expostos a uma radiação de RF em 900 MHz pulsada em 217 Hz (com pulsos de 576  $\mu\text{s}$ ) durante quarenta e cinco minutos por dez dias,

com os testes feitos logo após a exposição ou depois de intervalos de quinze e trinta minutos. Observou-se que alguns animais testados imediatamente após a exposição apresentaram um desempenho mais irregular e levaram mais tempo para concluir os exercícios [50].

Os estudos comportamentais na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) tiveram início com a avaliação do aprendizado de ratos da espécie *Rattus norvegicus* submetidos a uma radiação na frequência de 2,45 GHz com uma densidade de potência de 1,6 mW/cm<sup>2</sup>, durante uma hora diariamente. Os testes, executados por Mohit Gheyi, foram realizados com uma gaiola de Skinner e o comportamento eliciado foi a obtenção de água por parte dos sujeitos sem o auxílio do experimentador. Como resultado, verificou-se uma diferença significativa no aprendizado dos animais do grupo experimental, que demonstraram maior dificuldade, quando comparados ao grupo de controle [5, 46].

A avaliação do nível de ansiedade e estresse em animais submetidos à radiação não-ionizante é um tópico muito importante dentro dos estudos comportamentais. Isto deve-se a evidências de possíveis alterações no sistema imunológico face à exposição a campos de RF e os reflexos desses efeitos sobre o sistema psicológico dos indivíduos. Na USP, alguns trabalhos utilizando a restrição de dietas em ratos como fator discriminatório vêm sendo executados para análise do grau de ansiedade [51].

A presente pesquisa se concentrará na realização de uma série de experimentos, descritos detalhadamente em capítulos posteriores, a fim de avaliar os efeitos comportamentais advindos da exposição à radiação emitida pelos telefones celulares.

### 3.4 Efeitos Indiretos

Diversos indícios apontam os efeitos nocivos dos telefones móveis não apenas como função dos efeitos diretos da exposição à radiação eletromagnética, mas também por meio de interferências indiretas sobre a habilidade dos usuários em desempenhar algumas tarefas. A interferência do uso do equipamento sobre os motoristas enquanto dirigem é talvez o mais importante e divulgado exemplo dos efeitos indiretos.

Para a população em geral, as conseqüências negativas para a segurança no trânsito

relacionada à ocupação das mãos do motorista ao usar o telefone celular são mais aceitas e compreendidas. Porém, é talvez menos óbvio que conseqüências idênticas possam ocorrer com o uso de equipamentos que deixam as mãos livres. Experiências psicológicas forneceram evidências significativas indicando que se duas ou mais tarefas envolvendo o esforço mental são realizadas simultaneamente, o rendimento é bem pior que o obtido quando uma tarefa é executada por vez. Segundo a psicologia, além da interferência periférica que surge quando um motorista tenta operar o veículo e manipular o telefone com as mãos, tem-se ainda fontes de interferência central aparecendo quando a demanda mental exigida pela conversação com o telefone celular concorre com aquela requerida pela direção.

Alguns trabalhos em laboratório, avaliando tarefas análogas a dirigir, tal como tarefas de trajetórias visuo-espaciais ou simuladores de trânsito, e outras atividades utilizando carros convencionais e situações corriqueiras de trânsito (rodoviário) foram desenvolvidas. Constatou-se os efeitos danosos envolvendo a conversação com aparelhos celulares sobre o desempenho no trânsito em pesquisas, analisando o tempo de reação a estímulos imperativos [52], as falhas para reagir a situações de perigo [53] e a manutenção da distância de segurança em relação ao carro da frente [54]. A respeito dos efeitos obtidos ao se comparar os dois modos de operação do celular, com ou sem equipamentos que deixam as mãos livres, Strayer e Haigney não relataram qualquer diferença, confirmando a teoria psicológica dos “efeitos centrais” [52, 54].

As pesquisas têm evidenciado ainda a associação entre o uso dos telefones na forma convencional (sem o uso de equipamentos, liberando as mãos) e uma redução no controle da direção. Neste sentido, Lamble (1999) observou que os usuários dos telefones gastam o triplo do tempo para frear o carro em relação a motoristas com 0.05% de álcool no sangue (valor limite para muitos países europeus) [55]. Por fim, poucos estudos epidemiológicos sobre as conseqüências do uso dos celulares na taxa de acidentes de trânsito foram efetuados e seus resultados são muito contraditórios.

Um aspecto interessante a ser ressaltado é a escassez de estudos comparando o desempenho de motoristas falando ao telefone e conversando pessoalmente com um outro passageiro do veículo. Boas razões levam a crer que os riscos provenientes da conversa com um passageiro são bem menores se comparados ao uso dos aparelhos. A

justificativa para tal reside no fato de o passageiro ser capaz de monitorar o trânsito e poder interagir em determinadas circunstâncias (suspendendo a conversa durante uma ultrapassagem por exemplo), alertando o motorista em situações de perigo.

### **3.5 Conclusões**

O capítulo exibiu uma revisão da literatura a respeito dos efeitos biológicos, comportamentais e indiretos da radiação não-ionizante sobre os sistemas biológicos. No capítulo seguinte, serão apresentados os testes comportamentais usados para avaliação psicológica dos sujeitos.

# Capítulo 4

## Testes para Avaliação Comportamental

### 4.1 Introdução

Na experimentação psicológica com animais procura-se, quase sempre, controlar sua motivação, privando-os de água ou alimento e também por meio de estímulos aversivos [56]. Labirintos são amplamente utilizados em estudos de aprendizagem animal e análise do nível de estresse. Os labirintos podem apresentar as mais diversas formas, podem ser ou não aquáticos e podem ser usados para variadas finalidades, permitindo observar o comportamento dos animais frente a ambientes amplos, situações de insegurança, entre outras [57].

Este trabalho de pesquisa contará com três testes diferentes para avaliação psicológica dos sujeitos: teste com a gaiola de Skinner, teste com o labirinto elevado em forma de cruz e teste com o labirinto aquático (tanque de Morris), além do monitoramento do consumo de água, ração e pesagem dos animais a fim de controlar o bom estado nutricional deles.

## 4.2 Teste com a Gaiola de Skinner

A gaiola de Skinner é uma gaiola experimental que segue os princípios básicos de aparelho análogo desenvolvido pelo professor B. F. Skinner. Ela é freqüentemente utilizada em testes de aprendizagem usando a privação de água como fator de motivação. Sua estrutura moderna permite um melhor controle das variáveis experimentais e mais acurados registros do comportamento [56, 58].

A gaiola é constituída por uma câmara experimental com uma porta de plástico transparente em sua parte frontal onde o animal permanece durante os testes, sendo observado. Esta porta possui um dispositivo impedindo que ela se desloque com facilidade. Na parte inferior da câmara é colocada ainda uma bandeja para o recolhimento dos detritos. Na parede direita do lado interno da gaiola encontra-se uma barra que, ao ser levemente pressionada, produz um clique característico, fornecendo uma gota de água ao bebedouro, localizado logo abaixo desta. Tem-se ainda uma caixa de controle eletrônico externo acoplada à câmara com a qual é possível realizar o controle do tempo do experimento; da intensidade luminosa, com 5 níveis de intensidade; acionamento manual ou automático do bebedouro; alarme sonoro e ainda possui um conector para adaptação de interface externa a fim de realizar o controle computadorizado. Toda estrutura da gaiola é mostrada na Figura 4.1.

No intuito de analisar as possíveis alterações comportamentais nos ratos de laboratório realiza-se o condicionamento operante dos sujeitos, processo compreendido como o eliciamento de um comportamento alvo mediante a utilização de reforço-estímulo capaz de aumentar a freqüência deste comportamento. Tal processo engloba diversos estágios, dos quais pretende-se realizar sete exercícios:

- **Nível Operante**

No condicionamento operante o reforço aumenta a probabilidade de ocorrência de uma resposta natural de um organismo. Assim, entende-se por nível operante a freqüência com que esta resposta se manifesta antes do condicionamento, visando verificar o comportamento dos sujeitos antes do início deste.

Neste caso específico, realizar-se-á um pré-teste observando cada animal, ao ser



Figura 4.1: Foto da Gaiola de Skinner usada nos testes.

colocado dentro da gaiola, durante um intervalo de tempo de 5 minutos, registrando os comportamentos mais freqüentes. Posteriormente, durante 30 minutos, esses comportamentos serão novamente registrados.

- **Treino ao Bebedouro**

O principal objetivo do treino ao bebedouro é fazer com que o sujeito se aproxime do bebedouro para localizar a água ao ouvir o seu ruído de funcionamento. Este treino visa comprovar um princípio básico do comportamento: “respostas que são seguidas por reforço aumentam de freqüência”.

Para tanto, inicialmente, coloca-se o sujeito dentro da gaiola e espera-se que o mesmo encontre uma gota de água previamente concedida, fornecendo-lhe mais 5 gotas consecutivas. Posteriormente, dá-se ao animal mais 20 gotas não-consecutivas, administradas respeitando-se uma distância mínima entre o sujeito e o bebedouro.

- **Modelagem**

A Modelagem está relacionada às ações do experimentador no intuito de fazer o sujeito atingir o comportamento terminal. Neste caso, o experimentador irá



---

modelar o comportamento de pressionar a barra mediante o uso da técnica de aproximações sucessivas.

A posição do animal na gaiola em relação à barra é a resposta a ser modelada e o objetivo final é fazer o rato pressionar a barra e obter água sem que seja necessário a interferência do experimentador. Cabe ainda ao experimentador escolher os comportamentos a serem reforçados e os critérios de mudança da resposta adotada.

Neste exercício, dividido em duas fases, com o sujeito dentro da gaiola e o bebedouro posicionado no modo automático, o desempenho desejado é fazer o rato pressionar a barra por, no mínimo, seis vezes consecutivas, sem nenhuma interferência, e posteriormente, continuar o procedimento até que o animal atinja o número máximo de pressionamentos estipulado como critério de saciação (60 vezes).

- **Saciação**

O processo de saciação consiste em uma repetição da última etapa da modelagem e tem como finalidade verificar o número médio de reforços suficientes para saciar o sujeito experimental, ou seja, a quantidade de gotas necessárias para saciar o rato. Tal repetição é justificada pela grande importância do processo, uma vez que o sujeito saciado não emitirá resposta.

Desta forma, o animal é colocado na gaiola ficando lá até pressionar 60 vezes a barra, critério pré-estabelecido para considerar o animal saciado.

- **Intervalo Variável**

Este procedimento é um esquema de reforço intermitente, ou seja, o reforço não é fornecido todas as vezes que o sujeito emite uma resposta de pressionamento sobre a barra, mas sim após intervalos de tempo escolhidos aleatoriamente, visando não criar uma noção de tempo fixo para que o animal espere o reforço.

Neste teste específico, as gotas de água serão liberadas usando intervalos variáveis de tempo de 20, 40, 10 e 50 segundos (VI 30"), registrando-se, ao final de cada

intervalo, o número de vezes que o rato pressionava a barra sem receber o reforço. Repete-se o procedimento por 20 vezes.

- **Discriminação**

O experimento de Discriminação tem por objetivo verificar a influência da situação ambiental sobre a expressão de um comportamento, neste caso a luz é o estímulo discriminativo para a resposta de pressionar a barra. O controle da situação ou alguns de seus estímulos sobre a emissão da resposta é chamado de controle discriminativo.

O procedimento para a discriminação é um esquema em que as situações de presença de luz ( $S^D$ ) e ausência desta ( $S^\Delta$ ) são alternados. Assim, uma resposta será emitida com mais frequência numa situação estimuladora, na qual o reforço segue o comportamento, e não será frequente na situação em que o reforço não acompanha sua emissão. Pode-se dizer então que uma discriminação foi estabelecida para o animal quando uma certa resposta é emitida com uma alta frequência sob as condições  $S^D$  e com uma baixa frequência sob as condições de  $S^\Delta$ .

Neste caso específico, o estímulo discriminativo ( $S^D$ ) será a luz em sua máxima intensidade e o estímulo não-reforçador será a ausência de luz. A fim de evitar uma saciação muito rápida dos animais, nas situações de  $S^D$  será usado um esquema de reforço intermitente numa ordem aleatória. Os períodos de  $S^\Delta$  devem ter uma duração mínima de dois minutos e considera-se a discriminação estabelecida quando ocorrerem 3 períodos de  $S^\Delta$  sem resposta.

- **Extinção**

O teste de Extinção tem como finalidade verificar o resultado produzido sobre a frequência do comportamento face a suspensão do estímulo reforçador, visando comprovar que na ausência do reforço ocorre uma diminuição em sua frequência.

Neste teste, com o bebedouro no modo automático, registra-se o tempo do primeiro pressionamento e deixa-se de ofertar o reforço logo após o sujeito ter tomado 10 gotas de água, anotando-se tempo necessário para o rato receber tais reforços.

Registra-se ainda, numa segunda etapa, o tempo em que o animal permanece 10 minutos sem pressionar a barra, quando processo de extinção é concluído.

### 4.3 Teste com o Labirinto Elevado em forma de Cruz

Na pesquisa, o labirinto elevado em forma de cruz é utilizado para análise do nível de ansiedade e estresse dos animais. Sua metodologia baseia-se na escolha, pelos sujeitos experimentais, dos diferentes braços do labirinto, tal como ocorre nos demais labirintos radiais, nos labirintos em forma de **T** ou de **Y**.

O labirinto elevado em forma de cruz é constituído por quatro braços, sendo dois braços apresentando as laterais abertas, dotados de uma proteção de acrílico a fim de evitar possíveis quedas dos animais, e dois cujas laterais são fechadas. Os braços possuem dimensões de 50 cm × 10 cm e encontram-se a uma altura de 50 cm do solo. Sua estrutura é mostrada na Figura 4.2.

O grau de estresse é medido em função da frequência de entradas num determinado braço e o tempo de permanência nele, sendo a taxa de resposta entre o número de entradas nos braços abertos pelo número de entradas totais nos braços, tanto abertos como fechados, a principal variável de interesse neste estudo. Neste caso, quanto maior for a razão, menor o grau de estresse do animal. A metodologia seguida por esta pesquisa baseou-se em um trabalho análogo, já divulgado na literatura, envolvendo a análise do nível de estresse em grupos de sujeitos submetidos a diferentes tipos de dietas [51].

O procedimento de coleta de dados é realizado manualmente. Utilizando uma folha de registro e um cronômetro, anota-se o número do braço onde o animal entrar juntamente com tempo de permanência neste local. Com a intenção de minimizar as variáveis inerentes ao exercício, o labirinto é isolado de perturbações externas com biombos. O observador realiza a coleta com base em imagens registradas por uma câmera interligada a um computador e posicionada acima do labirinto. Isto é mostrado na Figura 4.3.

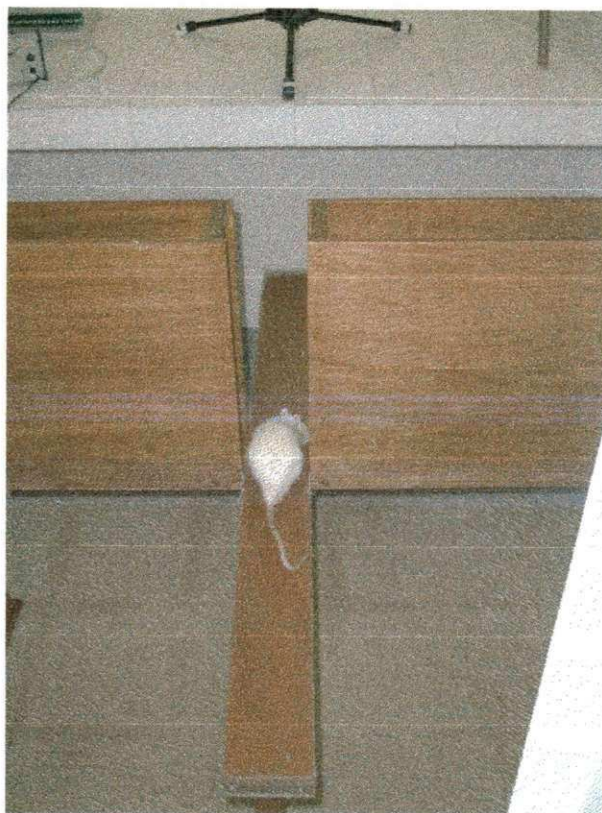


Figura 4.2: Foto do labirinto em cruz.



Figura 4.3: Foto da estrutura montada para coleta de dados.



Os procedimentos experimentais, análogos para todos os animais, têm início colocando-se o rato em uma arena de madeira, durante 5 minutos, para sua familiarização com o ambiente. Posteriormente, o animal é posicionado no centro do labirinto (zona neutra) virado na direção do braço 4 (braço aberto a esquerda), registrando-se então o número de entradas e a permanência dos animais em cada braço, por um período de 5 minutos. Ao final de cada sessão executa-se a esterilização do labirinto. Visando manter uma regularidade, faz-se necessário o estabelecimento de um horário fixo para realização do experimento.

#### **4.4 Teste com o Labirinto Aquático (Tanque de Morris)**

Dentre os diversos procedimentos e aparelhos desenvolvidos para avaliar o desempenho de animais em labirintos, o teste de aprendizagem espacial no labirinto aquático, introduzido em 1981 por Richard Morris, vem se destacando nos estudos sobre a neurobiologia da memória [59].

O labirinto aquático é intensamente utilizado em trabalhos sobre a capacidade de orientação espacial em roedores e a retenção dessas informações por períodos variáveis de tempo. Uma das principais vantagens práticas deste procedimento é a velocidade de treinamento e, no caso de animais como o rato, nadadores natos, o aprendizado da tarefa é obtido com menos de 15 tentativas [60].

O aparelho consiste em uma piscina cujas formas e medidas variam de um experimento para outro. Neste caso utiliza-se um tanque circular de PVC com 70 cm de diâmetro e 40 cm de altura cheio de água misturada com leite, tornando-a opaca e dificultando o acesso visual a objetos imersos. Quatro plataformas são usadas, duas com 28 cm de altura, ficando totalmente submersas, e duas com 32 cm, visíveis aos animais, nas cores preta e branca. Desta forma, dois elementos discriminativos estão presentes, a altura (ou visibilidade) e as cores das estruturas. As plataformas são canos de PVC de 10 cm de diâmetro preenchidas com areia e pedras e tampadas com PVC. Elas são posicionadas a 25 cm da parede do tanque, pois os animais, desconhecendo sua

posição, às vezes percorrem o perímetro da piscina e assim teriam maior probabilidade de encontrá-la casualmente se ela estivessem próxima a borda.

Em todos os testes a coluna de água tem uma altura de 31 cm e sua temperatura é mantida a  $26 \pm 1^\circ\text{C}$ , evitando grandes oscilações, isso porque a temperatura da água interfere diretamente na motivação dos animais [57,61].

Toda estrutura será colocada sobre uma mesa de madeira com 67,5 cm de altura, facilitando a limpeza e o manuseio dos sujeitos pelo experimentador. O laboratório com dimensões de 8,96 m  $\times$  5,96 m onde são feitos os testes, é iluminado por luz fluorescente e não tem as posições dos objetos e da piscina alterados, visando obter resultados mais precisos e confiáveis. A estrutura do labirinto aquático e seu posicionamento dentro do laboratório podem ser observados na Figura 4.4.



Figura 4.4: Foto do labirinto aquático.

Inicialmente, o animal é submetido a uma sessão de treino que consiste em colocá-lo na água com o focinho voltado para parede do tanque, na extremidade diametralmente oposta à da plataforma, sendo em seguida liberado até localizar a estrutura, esteja ela submersa ou não, e subir nela com as quatro patas, evitando então sua permanência na água. Caso o animal não encontre a plataforma em um tempo de dois minutos, ele deve ser conduzido até ela sendo deixado sobre a plataforma por 15 a 20 segundos. O processo é repetido sucessivamente por 8 vezes, sendo 4 com a plataforma alta e 4 com a plataforma baixa.

A cada nova tentativa, o animal é liberado de pontos diferentes da borda do tanque, porém equidistantes em relação à localização da plataforma, visando forçar o uso de estratégias de guiamento por parte dos animais.

O desempenho dos sujeitos é avaliado pela latência (intervalo de tempo) desde a sua liberação até seu posicionamento sobre a plataforma e a retenção da aprendizagem espacial é medida 24 e 48 horas após a sessão de treino.

A manutenção das informações espaciais adquiridas durante o treinamento é analisada em diferentes intervalos de tempo ao longo da vida do animal (30, 60 e 90 dias de idade) visando verificar modificações no arquivamento e evocação de memórias de longa duração.

## **4.5 Análise Estatística Aplicada aos Resultados**

A ausência de uma avaliação estatística ou uma análise incorreta são os principais problemas enfrentados em trabalhos experimentais, podendo conduzir a uma interpretação errônea dos resultados. A fim de aumentar a confiabilidade do estudo, visando obter uma interpretação clara e precisa dos resultados experimentais, este trabalho apresenta um tratamento estatístico dos dados coletados.

O tratamento estatístico aplicado aos dados consiste em calcular a média aritmética de todas as medidas coletadas e, em seguida, calcular um intervalo de confiança de 95% em torno dela. Posteriormente, realiza-se uma segunda avaliação dos dados, excluindo aqueles que se encontram fora do intervalo estabelecido. Desta forma, além de eliminar os valores mais discrepantes, ainda é considerado um número relativamente alto e consistente de valores. A partir de então, repete-se o cálculo da média e do intervalo de confiança para os resultados restantes (considerados válidos) e, adicionalmente, obtêm-se o desvio padrão para as medidas.

Alguns conceitos e métodos utilizados para esta avaliação estão dispostos no Apêndice A, dando ênfase ao tratamento com distribuições de freqüências, devido aos dados obtidos se apresentarem desta forma.



## 4.6 Conclusões

O capítulo abordou uma descrição detalhada das experiências computamentais realizadas, incluindo seus objetivos e a metodologia adotada. Ao final, o texto retrata a importância do tratamento estatístico dos dados coletados, cujos conceitos básicos usados na análise dos resultados encontram-se no Apêndice A.

# Capítulo 5

## Metodologia de Trabalho

### 5.1 Introdução

Na década de 1990, cientistas pesquisadores (biólogos, engenheiros, médicos especialistas e físicos) de diversas instituições, especialmente nos EUA, eram os mais entusiasmados entre a comunidade “bioeletromagnética”. A principal iniciativa de pesquisa concentrou-se na investigação dos efeitos biológicos e alterações comportamentais da radiação RF emitida pelos telefones celulares.

Atualmente ainda há uma carência de consenso científico em relação aos estudos experimentais comprovando evidências que neguem ou apoiem os riscos à saúde causados pela radiação de microondas dos telefones celulares. As incertezas persistem, em parte, devido ao número limitado e à extensão dos estudos desenvolvidos. No entanto, o problema de determinação das implicações sobre a saúde não pode ser colocado sem a presença de uma crítica dos cientistas que trabalham com assuntos cruciais à interação da radiação proveniente dos celulares com os sistemas biológicos. Sem a pesquisa científica, baseada em conhecimentos desenvolvidos e acumulados, levará muito mais tempo para descobrir se o uso de um aparelho celular é ou não seguro [62].

A resposta de sistemas físicos sobre a maioria das circunstâncias apresenta limites razoavelmente pequenos de flutuações. Logo, a observação de um fenômeno físico pode ser repetida administrando a experiência de uma maneira prescrita e confiavelmente confirmada por meio de outras formas comparáveis. Tal repetibilidade pode ajudar na

confirmação da observação, não como mera coincidência isolada, mas como um evento que ocorre regularmente e pode ser reproduzido. Sistemas biológicos e organismos são complexos e suas respostas são variáveis, sendo o comportamento deles frequentemente incerto, até mesmo sob condições semelhantes de exposição. A repetição de uma observação é muito importante, pois apenas um conjunto de estudos repetidos ou confirmados independentemente pode conduzir a uma associação estatisticamente significativa ou uma resposta convincente para alguma pergunta saúde-efeito.

Seguindo esta metodologia de repetições sucessivas bem administradas dos testes, a presente pesquisa tem por objetivo dar continuidade a uma série de trabalhos iniciados em 1998, avaliando os possíveis efeitos biológicos e comportamentais proveniente da radiação emitida pelos telefones celulares.

## **5.2 Laboratório**

O Laboratório de Comunicações (LABCOM), com instalações no bloco CJ da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, foi fundado em 1979 e desde então desenvolve pesquisas nas mais diversas áreas de comunicações. Em maio de 1999 o LABCOM sofreu um processo de divisão, passando a ser constituído pela Divisão de Simulação de Sistemas, com o laboratório instalado no Departamento de Engenharia Elétrica, e pela Divisão de Efeitos da Radiação, cujo laboratório está instalado no Departamento de Ciências Básicas da Saúde, onde os trabalhos de natureza biomédica são desenvolvidos.

Além dos alunos de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica e Medicina envolvidos no projeto, este estudo conta ainda com a colaboração de quatro médicos, duas psicólogas e um técnico em medicina. Assim, tem-se uma equipe multidisciplinar capaz de oferecer todo suporte no tocante aos conhecimentos necessários para a continuidade dos estudos.

## **5.3 Sujeitos Experimentais**

Os sujeitos experimentais utilizados nos testes são ratos da espécie *Rattus norvegicus* obtidos do biotério do curso de Medicina da Universidade Federal de Campina Grande e

também do biotério de fisiologia da Universidade Federal de Pernambuco. Um exemplo deste animal pode ser visualizado na Figura 5.1.



Figura 5.1: *Rattus norvegicus*, sujeito experimental.

A escolha desse animal deve-se ao, fato dele ser um animal pequeno, limpo, fácil de cuidar e domesticar, de manutenção barata e, além disso, por existir um grande e consistente conjunto de dados experimentais referentes ao seu comportamento, uma vez que vêm sendo usados com frequência na pesquisa psicológica. Com a descoberta da seqüência do genoma do rato, destaca-se também a grande semelhança genética entre ratos e humanos. Ambos os seres possuem aproximadamente 30.000 genes, com seqüências similares, e cerca de 99% dos genes encontrados nos ratos possuem equivalentes no genoma humano, restando apenas poucas centenas que são peculiares a uma das espécies. Tal fato vem ressaltar a importância de pesquisas realizadas com ratos de laboratório no intuito de combater diversas enfermidades humanas [63, 64].

A validade dos modelos animais fundamenta-se no princípio no qual as espécies apresentam um *continuum* evolutivo em que, apesar dos níveis de complexidade serem diferentes, as estruturas e funções dos organismos permanecem constantes. Nos casos em que os riscos das pesquisas para a vida ou saúde humana são elevados ou quando as técnicas exigem tempo, espaço e controle muito restrito sobre o sujeito em estudo, esta metodologia é essencial [65].

No laboratório, os animais encontram-se dispostos em caixas retangulares de pro-

pileno com 41 cm de comprimento por 34 cm de largura e com uma altura de 18 cm. A tampa é uma grade formada por barras de aço galvanizada, na qual foram adaptados comedouro e bebedouro, conforme mostrado na Figura 5.2.



Figura 5.2: Estrutura na qual os ratos estão alocados.

A alimentação dos animais é constituída por uma ração comercial balanceada da marca Purina cuja composição inclui farelo de milho, farelo de soja, milho integral moído, farinha de peixe, fosfato de cálcio, óleo de soja degomado, carbonato de cálcio e cloreto de sódio. A ração e a água estão disponíveis para os animais durante todo o período, exceto nas 36 horas que antecedem os testes com a gaiola de Skinner, quando os sujeitos passam por um período de privação de água.

Realizou-se um monitoramento regular do consumo de água e ração assim como a pesagem dos animais visando ter-se um melhor acompanhamento desses. É importante destacar que as condições de iluminação, temperatura e umidade no laboratório são mantidas constantes, evitando possíveis alterações comportamentais nos indivíduos.

## 5.4 Amostras e Procedimentos Básicos

Nos experimentos é usada uma amostra com 40 animais, divididos em dois grupos distintos com 20 sujeitos(10 machos e 10 fêmeas) em cada um deles, classificados segundo a exposição à radiação:



- Grupo de Controle– Os animais que estão isentos da exposição à radiação;
- Grupo Experimental– Os ratos que são submetidos desde a gestação à radiação de microondas na frequência de 850 MHz por uma hora diária, recebendo uma densidade de potência de  $0,6 \text{ mW/cm}^2$  (nível máximo permitido para a radiação com esta frequência) [14].

É importante ressaltar que, apesar das fêmeas não serem comumente usadas em experimentos comportamentais devido ao fato de suas atitudes e reações sofrerem intensa influência das variações hormonais, optou-se por trabalhar também com animais do sexo feminino na tentativa de se obter uma maior aproximação dessas circunstâncias com a realidade. Assim, todos os animais participaram das avaliações de aprendizagem e do nível de estresse utilizando o labirinto aquático e o labirinto elevado em forma de cruz, respectivamente. A fim de obter um acompanhamento comportamental dos ratos nas diversas etapas de sua vida, foram realizados testes com os sujeitos na faixa de 30, 60 e 90 dias de idade.

Para o teste de aprendizagem com as gaiolas de Skinner, faz-se necessário os indivíduos atenderem a alguns requisitos como serem machos e possuírem de 90 a 120 dias de vida, sendo executado apenas um teste por geração de animais, utilizando os sujeitos do sexo masculino de cada grupo. É válido destacar ainda que, no propósito de avaliar a capacidade de memorização, dentre os diversos exercícios realizados para o condicionamento dos ratos, somente o teste da discriminação é repetido, com a repetição ocorrendo aproximadamente 10 a 15 dias após o término do experimento. Tal fato é justificado devido aos demais testes contribuírem para o processo de aprendizagem, não sendo necessário repetí-los uma vez que os sujeitos já estariam condicionados.

## 5.5 Fonte Geradora de Microondas

O conjunto que funciona como fonte geradora da radiação de microondas é formado por um transmissor analógico e uma antena LPD.

O transmissor utilizado durante os experimentos é um transmissor analógico do tipo Rádio Ericsson Telecomunicações modelo BTE 101101/11 com uma potência de

saída limitada em 10 W, operando na faixa de frequência 869-894 MHz e usando padrão AMPS com modulação em frequência alimentado por uma fonte DC de 24V e controlado por *software*. A escolha desta frequência deve-se ao fato de, no Brasil, os telefones celulares portáteis utilizarem portadoras de radiofrequências entre 800 e 900 MHz para as bandas “A” e “B”.

A vantagem deste tipo de transmissor é que, pelo fato de ser controlado por *software* (*Local Control*—plataforma Windows), disponibiliza ao operador uma série de recursos como ajuste mais preciso da potência emitida e desligamento automático do equipamento após o período de irradiação dos animais, facilitando a realização do experimento e minimizando a ocorrência de erros quanto ao controle de tempo da exposição.

A antena é do tipo Antena Dipolo Log-Periódica-LPD 7907/2N com impedância de saída de  $50 \Omega$ , operando na faixa de microondas de 790 a 960 MHz . Tal antena, cedida pela Tele Nordeste Celular (TIM), apresenta um tamanho pequeno, possui baixo peso e fornece a densidade de potência desejada para realização do experimento. O conjunto rádio analógico e antena transmissora é mostrado na Figura 5.3.

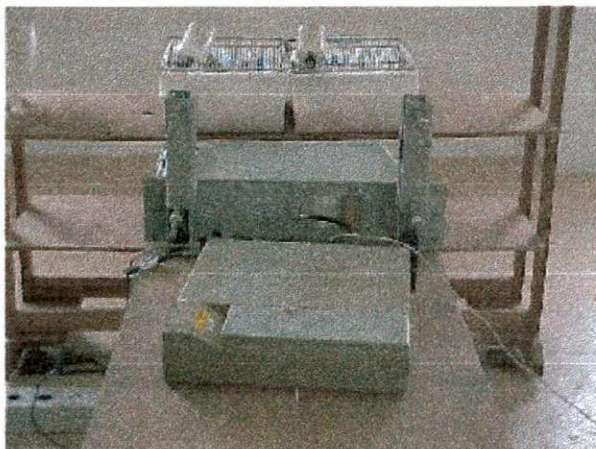


Figura 5.3: Vista posterior do conjunto transmissor analógico e antena LPD.

## 5.6 Construção dos Diagramas de Irradiação

O diagrama ou padrão de irradiação de uma antena é a distribuição geográfica da potência irradiada pela fonte. Ele é usualmente apresentado nos planos de azimute (horizontal) e elevação (vertical). O padrão de uma antena real ilumina uma região mais intensamente que outra, tendo-se assim um lóbulo principal e pequenos lóbulos secundários (laterais).

A medição e construção do diagrama de irradiação da antena em uso é muito importante para a identificação de parâmetros como ganho, diretividade, potência irradiada e densidade de potência. Os conceitos básicos sobre a teoria de Antenas são apresentados mais detalhadamente no Apêndice B [66].

Para o ajuste da densidade de potência requerida nos testes ( $0,6 \text{ mW/cm}^2$ ) pelo conjunto transmissor analógico/antena, fundamental para o correto posicionamento dos animais durante a exposição, e o levantamento do diagrama de irradiação utiliza-se um medidor de campo EMR da *Wandel & Goltermann* cedido pelo CEFET de João Pessoa. No caso da antena LPD ajusta-se, via *software*, sua atenuação para 0 dB antes de dar início à medição. A partir de então, o procedimento é o seguinte: partindo-se do centro geométrico da antena, disposta sobre uma mesa de madeira, e utilizando a configuração básica da linha de visão (*mobile-line-of-sight*), na qual a antena sob teste está supostamente localizada na origem do sistema de coordenadas, mede-se o campo num raio  $r$  constante em torno da antena, variando-se os ângulos em intervalos também constantes ( $15^\circ$ ), e registra-se a densidade de de potência ( $\text{mW/cm}^2$ ) em cada ponto. Tal procedimento, feito tanto para coleta de dados no plano horizontal quanto vertical, está ilustrado na Figura 5.4.

O digrama de radiação da antena LPD utilizada, medido a uma distância de 55 cm, pode ser observado na Figura 5.5.

Verifica-se o ajuste da densidade de potência em torno dos equipamentos a cada trinta dias, comprovando assim se o nível radiação ao qual os ratos são submetidos está coerente com o desejado.



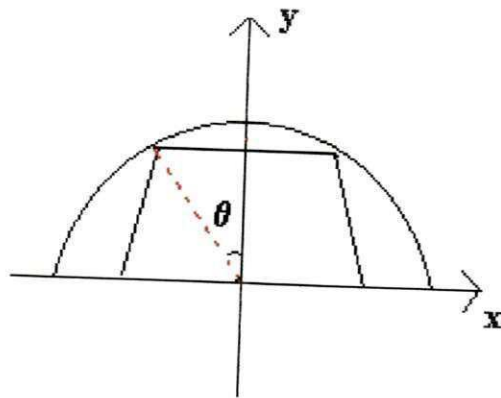


Figura 5.4: Ilustração do procedimento usado para a construção do diagrama de radiação.

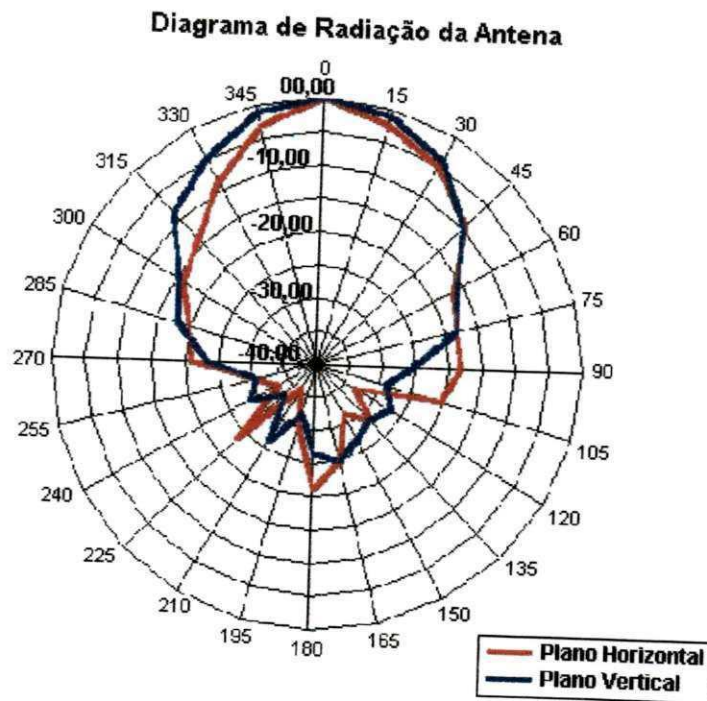


Figura 5.5: Diagrama de radiação da antena LPD.

## 5.7 Atividades Laboratoriais Desempenhadas

Sendo este estudo um trabalho experimental, faz-se necessário tomar uma série de cuidados e acompanhar intensamente a manutenção dos equipamentos e animais utilizados. É também imprescindível realizar constantes melhoramentos no ambiente de trabalho bem como introduzir novos testes com o objetivo de impulsionar e completar a pesquisa. Neste sentido, diversas atividades foram desenvolvidas.

Além do trabalho de manutenção, algumas intervenções foram feitas, como o controle de luminosidade da gaiola de Skinner; colocação de telas nas janelas do laboratório com o objetivo de limitar o número de variáveis externas interferindo no experimento; constantes medições da densidade de potência no local onde os animais ficam alocados durante a irradiação; dentre outras. Como contribuição para o enriquecimento da pesquisa, foi introduzido o experimento do Labirinto Aquático, teste importante e amplamente usado em estudos psicológicos para avaliação do aprendizado, realizando-se não só um estudo aprofundado da literatura como a montagem de toda a estrutura, contando para isto com o acompanhamento de uma psicóloga.

Desenvolveu-se ainda um novo projeto para o gerador de microondas de 2,45 GHz usado em trabalhos anteriores. O equipamento anterior apresentou problemas de oscilação no nível de potência ajustado, fazendo com que o valor da densidade de potência sobre os ratos excedesse o limite desejado.

Todo processo de cruzamento e reprodução dos animais é cuidadosamente realizado. Uma contagem do número de filhotes por grupo é fundamental porque alterações neste sentido podem estar relacionadas a variações no grau de ansiedade e estresse dos sujeitos.

É importante ressaltar ainda que foram feitos alguns experimentos usando ratos da quarta e quinta gerações (de 4 de janeiro de 2001 e 1 de junho de 2001 respectivamente) e alguns dos resultados preliminares desencadearam a publicação de dois artigos para o Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica (SBMO) em agosto de 2002 [1, 2]. Nos dois últimos meses desse estudo observou-se em alguns animais do grupo experimental tumorações localizadas no pescoço, conforme exibido na Figura 5.6. Segundo análise da médica patologista Rosalina Rosas, os tumores possuíam nítida

relação com a estrutura da glândula salivar. De acordo com o exame bacteriológico do material foi constatada a presença da bactéria *Klebsiella sp.* O aparecimento desta bactéria, normalmente, tem ligação com alterações no sistema imunológico ocorrendo geralmente em indivíduos imunodepressivos. Tal fato, no entanto, não se repetiu na geração seguinte mas continua-se intensificando as pesquisas, aprofundando os estudos comportamentais e avaliando possíveis ligações com o surgimento da bactéria.



Figura 5.6: Foto dos indivíduos com abscessos na área do pescoço.

## 5.8 Conclusões

Este capítulo fornece uma visão geral do laboratório, dos sujeitos experimentais e da fonte geradora de microondas utilizada nos testes. Além disto foi mostrado o diagrama de irradiação da antena, obtido por meio de medições em laboratório, e, por fim, algumas atividades de manutenção e melhoramento do ambiente de trabalho bem como a idealização e montagem de um novo experimento, contribuindo para o enriquecimento da pesquisa.

# Capítulo 6

## Resultados

### 6.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados resultados obtidos para as experiências descritas nos capítulos anteriores. Estas experiências foram realizadas em ratos de laboratório sendo um grupo submetido à radiação de microondas na frequência de 850 MHz e outro isento da radiação.

### 6.2 Pesagem e Monitoração do Consumo de Água e Ração

Em paralelo às experiências comportamentais, no decorrer de todo período de teste, executou-se a pesagem dos animais em diversas etapas de suas vidas assim como o monitoramento do consumo de água e ração dos sujeitos do grupo experimental e de controle.

Inicialmente verificou-se o peso de toda ninhagem para os indivíduos com 10 dias de nascidos, antes do desmame e antes de ser realizada a separação pelo sexo e a escolha dos animais que participariam dos testes. Posteriormente, com os dois grupos de 20 ratos já definidos e separados em machos e fêmeas, a medição foi efetuada com os ratos na faixa de 70 dias de vida e, por fim, com aproximadamente 100 dias de idade. As

médias dos pesos em cada uma das etapas estão expostas nas Tabelas 6.1 e 6.2.

Grupos	Controle	Experimental
Número de Animais	62	76
Média de Pesos (g)	13,136±0,12	12,81±0,09
Desvio Padrão	29,7%	20,8%

Tabela 6.1: Pesagem dos sujeitos com 10 dias de vida.

Grupos	Controle		Experimental	
	Machos	Fêmeas	Machos	Fêmeas
Número de Animais	10	10	10	10
Peso Médio em g (70 dias)	245±2	158±3	246±2,5	165±3
Desvio Padrão	20%	18,1%	23%	19%
Peso Médio em g (100 dias)	314,3±2,7	185,8±3	307,3±4,1	198,3±3,5
Desvio Padrão	20,23%	25,8%	24,3%	21,9%

Tabela 6.2: Média dos pesos dos sujeitos com 70 e 100 dias de idade.

De acordo com a Tabela 6.1, para os ratos com 10 dias de vida não foram verificadas alterações significativas nos pesos entre os animais dos dois grupos. Conforme os resultados da Tabela 6.2, devido aos ratos do sexo masculino serem normalmente maiores que os do sexo feminino, observa-se uma variação de pesos entre os animais machos e fêmeas pertencentes a um mesmo grupo. Entretanto, houve pequenas diferenças nos pesos de indivíduos do mesmo sexo de ambos grupos (cerca de 0,41% e 2,3% para os machos com 70 e 100 dias de vida respectivamente e de 4,25% e 6% para as fêmeas), indicando, neste aspecto, diminutas, mas possíveis alterações provocadas pela radiação.

Quanto ao monitoramento do consumo de ração, constatou-se uma certa equivalência no consumo entre os sujeitos do grupo experimental e de controle e, com relação ao consumo de água, observou-se um pequeno aumento do consumo por parte dos animais do grupo experimental (de 6,58% para as fêmeas e 7,03% para os machos). As médias do consumo diário de água e ração estão dispostas na Tabela 6.3. É possível que este aumento tenha relação com o provável aquecimento nos animais irradiados causado pela radiação emitida do conjunto transmissor analógico-antena.



Grupos	Controle		Experimental	
	Machos	Fêmeas	Machos	Fêmeas
Número de Animais	10	10	10	10
Consumo de Água (ml)	28,4	22,7	30,55	24,3
Consumo de Ração (g)	11,13	7,1	11,3	7,2

Tabela 6.3: Médias do consumo diário de água e ração dos sujeitos.

### 6.3 Labirinto Aquático

Nas etapas de treinamento dos ratos, realizadas nos períodos de 30, 60 e 90 dias de vida antes de cada sessão de avaliação do aprendizado, foram usadas plataformas altas e baixas e registrou-se o tempo gasto pelo sujeito para subir nelas em cada uma das 8 tentativas, sendo 4 com a plataforma alta e 4 com a plataforma baixa. Tal análise tem como objetivo verificar uma possível evolução na aprendizagem entre tentativas consecutivas. O desempenho médio para machos e fêmeas componentes dos grupos experimental e controle, usando um intervalo de confiabilidade de 95%, pode ser visualizado nas Tabelas 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 respectivamente .

Treinos GC	Média de Tempo por Tentativa (s)				Desvio Padrão			
	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª
Plat. Baixa (N=10)								
Machos (30 dias)	53,75±17,3	12,0 ±3,75	23,2±11,04	6,3±2,8	16,4%	15,96%	24,5%	22,5%
Fêmeas (30 dias)	95,8±30,14	6,2±3,3	8,4±4	18,8±8	16%	27,2%	24,3%	21,6%
Machos (60 dias)	3,5±1,58	2,5±0,43	5±1,63	3,3±1,2	23%	8,94%	16,7%	18,4%
Fêmeas (60 dias)	2,63±0,51	2,43±0,58	3,43±1,03	2,3±0,65	10%	12,2%	15,4%	14,3%
Machos (90 dias)	2,5±0,52	2,4±0,39	3,3±1,19	2,67±1,1	10,7%	8,3%	18,4%	20,7%
Fêmeas (90 dias)	1,67±0,4	2±0,37	2,14±0,79	1,7±0,56	12,6%	9,4%	18,85%	16,67%

Tabela 6.4: Resultados dos treinos do Labirinto Aquático com a plataforma baixa para os ratos do Grupo Controle com 30, 60 e 90 dias de vida.

Segundo os dados exibidos, tanto para plataformas baixas como para altas, observou-se, de um modo geral, para os indivíduos (machos e fêmeas) dos dois grupos, uma redução gradativa na média dos tempos gastos para subir nelas em cada etapa consecutiva (para os animais com 30, 60 e 90 dias), significando que houve um certo aprendizado ao longo do tempo tanto para o grupo experimental como para o de controle. Comparando, entretanto, os tempos médios por tentativa para sujeitos do mesmo sexo de

Treinos GE	Média de Tempo por Tentativa				Desvio Padrão			
	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª
Plat. Baixa (N=10)								
Machos (30 dias)	38,8±13,02	35,3±12,7	3,7±0,56	3,0±0,74	17,1%	18,3%	7,6%	12,6%
Fêmeas (30 dias)	8,83±3,26	12,37±7,4	8,6±3,7	4,3±1,52	18,8%	30,5%	22,2%	18,1%
Machos (60 dias)	5,89±2,82	2,8±0,6	3,87±1,36	3,33±0,41	24,4%	10,8%	17,9%	6,3%
Fêmeas (60 dias)	2,67±0,41	2,43±0,72	2,25±0,49	2,8±0,49	7,9%	15,2%	11,1%	8,9%
Machos (90 dias)	2,62±1,04	1,87±0,44	2,67±0,92	3,75±1,56	20,3%	12,1%	17,6%	21,2%
Fêmeas (90 dias)	1,37±0,36	1,67±0,65	1,75±0,71	1,71±0,56	13,3%	20%	20,9%	16,6%

Tabela 6.5: Resultados dos treinos do Labirinto Aquático com a plataforma baixa para os ratos do Grupo Experimental com 30, 60 e 90 dias de vida.

Treinos GE	Média de Tempo por Tentativa				Desvio Padrão			
	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª
Plat. Alta (N=10)								
Machos (30 dias)	110,8±14,84	67,4±27,6	10±5	4,3±1,73	6,83%	20,9%	26,8%	20,3%
Fêmeas (30 dias)	72,5±19,16	17,8±7,3	23,8±5,83	11,8±5,31	13,48%	21%	12,49%	23%
Machos (60 dias)	2,43±0,4	2,4±0,34	2,25±0,32	2,4±0,34	8,3%	7,2%	7,3%	7,2%
Fêmeas (60 dias)	4,67±1,2	2,83±0,93	3,5±1,33	2,14±0,28	13,2%	16,8%	19,17%	6,6%
Machos (90 dias)	2,2±0,3	2,6±0,66	2±0	2±0	6,6%	13,2%	0%	0%
Fêmeas (90 dias)	2,14±0,28	2,6±0,58	2,12±0,24	1,89±0,21	6,6%	11,6%	5,8%	5,9%

Tabela 6.6: Resultados dos treinos do Labirinto Aquático com a plataforma alta para os ratos do Grupo Controle com 30, 60 e 90 dias de vida.

Treinos GC	Média de Tempo por Tentativa				Desvio Padrão			
	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª
Plat. Alta (N=10)								
Machos (30 dias)	47,2±13,2	23,5±11	20,17±9,11	8,87±5,3	14,3%	25,8%	23%	30,6%
Fêmeas (30 dias)	93,8±26,7	11,17±3,37	4±1,07	13±5,5	14,5%	15,4%	13,7%	21,6%
Machos (60 dias)	3,25±0,32	2,25±0,32	2,7±0,36	2,7±0,56	5%	7,3%	6,8%	10,5%
Fêmeas (60 dias)	4±0,6	2,6±0,32	3±0,37	2,12±0,24	7,7%	6,2%	6,3%	5,9%
Machos (90 dias)	2,11±0,6	2±0,29	3,1±0,62	2,5±0,44	14,6%	7,4%	10,1%	8,94%
Fêmeas (90 dias)	1,57±0,39	1,89±0,51	1,87±0,24	2,1±0,19	12,8%	13,8%	6,7%	4,7%

Tabela 6.7: Resultados dos treinos do Labirinto Aquático com a plataforma alta para os ratos do Grupo Experimental com 30, 60 e 90 dias de vida.

ambos os grupos, houve uma variação muito grande e ora os ratos do grupo de controle realizavam os testes em um menor tempo, ora os indivíduos do grupo experimental apresentavam um melhor desempenho, não se mantendo uma regularidade e impossibilitando assim tirar conclusões sobre os possíveis efeitos da radiação neste caso. Vale destacar que, na primeira etapa dos treinos (30 dias), tanto com as plataformas altas como com as plataformas baixas, na primeira tentativa, os ratos do grupo experimental apresentaram um desempenho bem superior quando comparado ao do grupo controle, podendo tal fato estar relacionado a uma maior sensibilidade dos sujeitos do GE. Contudo, da primeira para segunda tentativa os sujeitos do GC apresentaram um maior grau de redução no tempo que os ratos do GE, demonstrando uma melhor evolução no aprendizado.

É importante ressaltar ainda que, para machos e fêmeas dos dois grupos, analisando tentativas seqüenciadas em cada uma das etapas, algumas vezes não ocorreu uma redução consecutiva dos tempos médios mas, ao contrário, o animal executou a tarefa em um tempo reduzido numa tentativa e em seguida apresentou uma queda no seu desempenho e vice-versa.

A avaliação do tempo médio em cada etapa para machos e fêmeas dos dois grupos pode ser realizada pela análise dos gráficos apresentados nas Figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6.

Conforme citado na descrição do experimento foram realizadas 2 sessões para a análise do aprendizado em períodos de 24 horas (1ª sessão) e 48 horas (2ª sessão) após os treinos. Em cada uma delas foi avaliada tanto a latência para subir nas plataformas altas (visíveis) e baixas (submersas) quanto a discriminação em relação às cores das plataformas (brancas e pretas). Os resultados obtidos estão dispostos nas Tabelas 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, 6.13. Novamente, fez-se um tratamento considerando um intervalo de confiança de 95%, obtendo-se desvios padrões, em torno da média, na faixa de 10% a 20%.

Examinando os resultados, considerando o desempenho de acordo com a altura das plataformas, exceto para algumas poucas medições, mais uma vez não se verificaram diferenças significativas no comportamento e na capacidade de aprendizagem entre os ratos do grupo de controle e experimental. Em geral, houve uma diminuição nos tem-



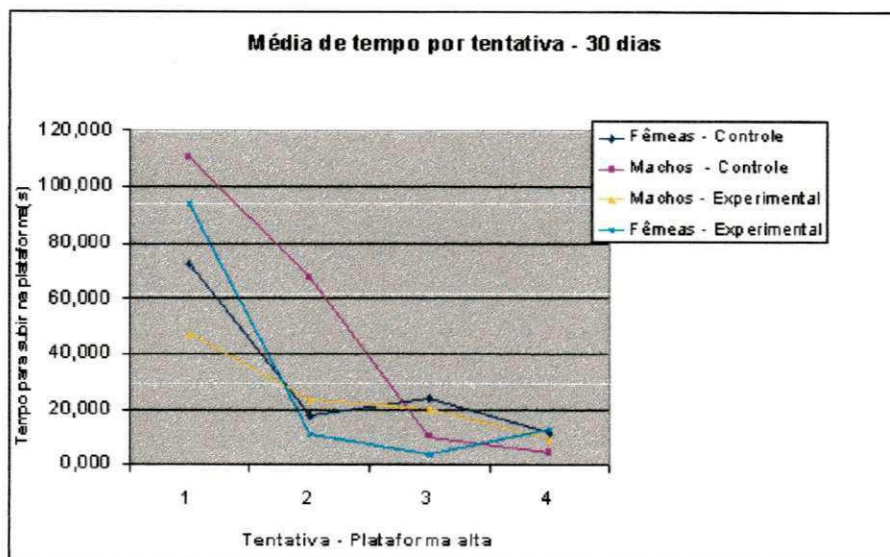


Figura 6.1: Treinos nas plataformas altas (30 dias).

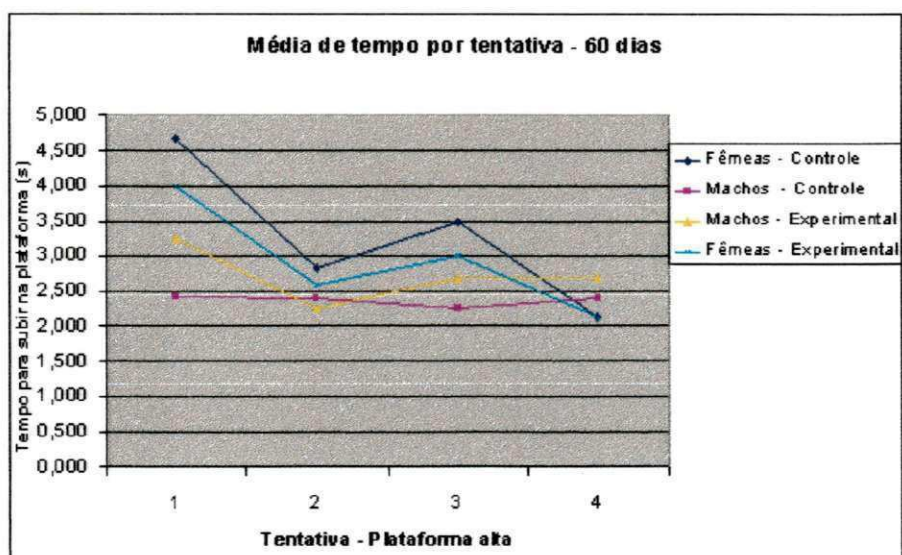


Figura 6.2: Treinos nas plataformas altas (60 dias).

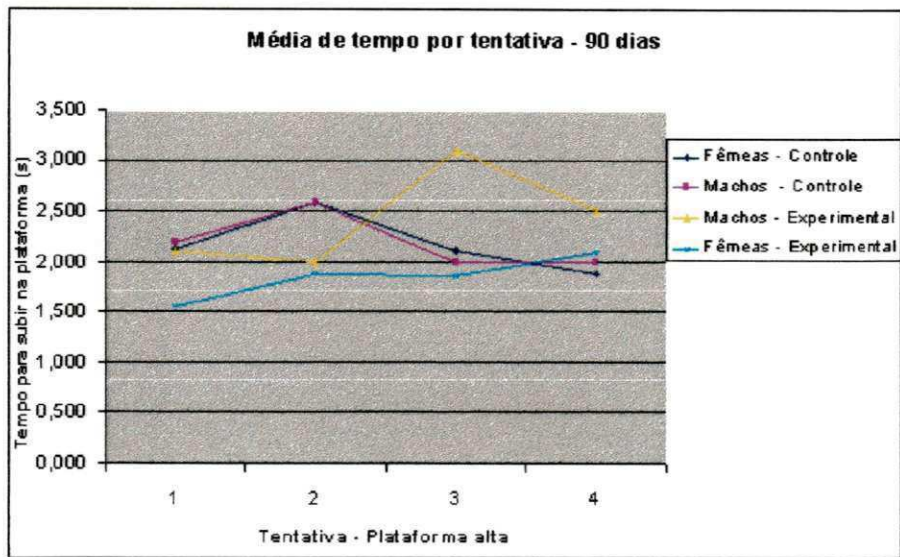


Figura 6.3: Treinos nas plataformas altas (90 dias).

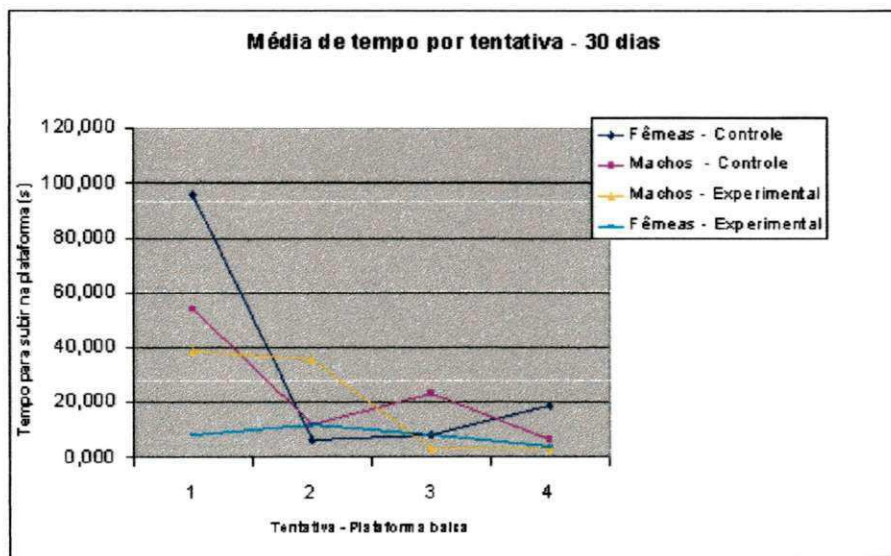


Figura 6.4: Treinos nas plataformas baixas (30 dias).

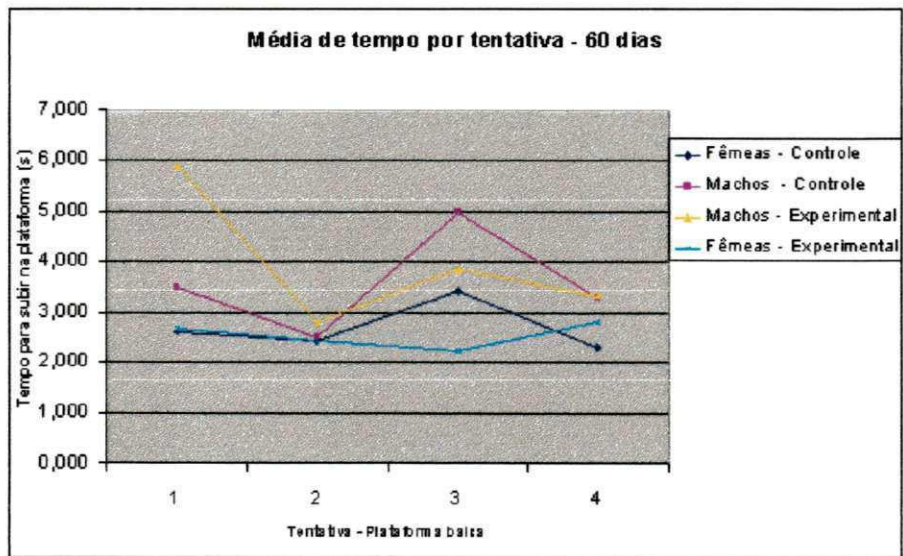


Figura 6.5: Treinos nas plataformas baixas (60 dias).

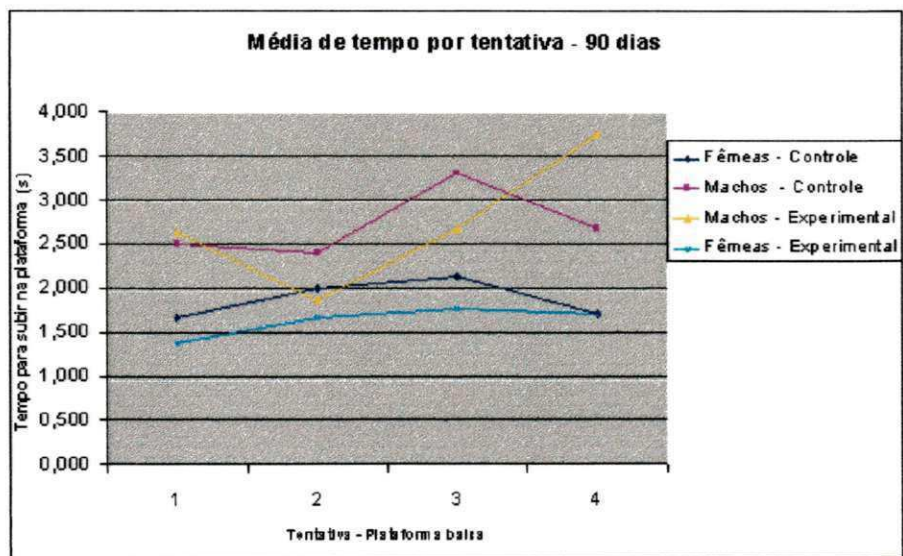


Figura 6.6: Treinos nas plataformas baixas (90 dias).

1ª Sessão		Controle		Experimental	
30 dias de Idade		Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)	Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)
Plataforma Alta Preta	MT (s)	25,17±4,73	2,83±0,6	3±0,64	3,6±0,48
	DP	9,6%	10,8%	10,9%	6,8%
Plataforma Alta Branca	MT (s)	4,4±1,46	2,67±0,82	4,4±1,47	3±0
	DP	17,5%	15,8%	17%	0%
Plataforma Baixa Preta	MT (s)	17±6	34,2±11,32	2,67±0,65	13,75±2,58
	DP	17,9%	16,9%	12,5%	9,56%
Plataforma Baixa Branca	MT (s)	3,6±1,12	6,75±2,7	2,85±0,75	4±1,39
	DP	16,9%	20,4%	16,1%	17,68%

Tabela 6.8: Resultados da 1ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 30 dias de idade.

1ª Sessão		Controle		Experimental	
60 dias de Idade		Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)	Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)
Plataforma Alta Preta	MT (s)	2,65±0,51	2,25±0,32	2,14±0,28	1,88±0,24
	DP	10%	7,3%	6,67%	6,67%
Plataforma Alta Branca	MT (s)	2,37±0,36	2,87±0,68	2,71±0,82	2,86±0,9
	DP	7,7%	12%	15,49%	16,07%
Plataforma Baixa Preta	MT (s)	2,8±0,77	2,5±0,64	2,38±0,52	1,78±0,29
	DP	14,2%	13,1%	11,08%	8,3%
Plataforma Baixa Branca	MT (s)	2,17±0,32	2,17±0,32	2,14±0,28	2,57±0,84
	DP	7,7%	7,7%	6,67%	16,67%

Tabela 6.9: Resultados da 1ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 60 dias de idade.

1ª Sessão		Controle		Experimental	
90 dias de Idade		Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)	Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)
Plataforma Alta Preta	MT (s)	1,6±0,32	2,3±0,41	2±0,33	2,29±0,36
	DP	10,2%	9%	8,33%	8,07%
Plataforma Alta Branca	MT (s)	2,17±0,32	3,2±1,14	2±0	2±0,65
	DP	7,69%	18,2%	0%	4,76%
Plataforma Baixa Preta	MT (s)	1,62±0,36	2,7±0,82	3,2±1,14	1,43±0,4
	DP	11,2%	15,5%	18,22%	14,14%
Plataforma Baixa Branca	MT (s)	3,57±1,12	1,87±0,69	2,2±0,39	1,17±0,33
	DP	16%	18,7%	9,09%	14,29%

Tabela 6.10: Resultados da 1ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 90 dias de idade.



2ª Sessão		Controle		Experimental	
30 dias de Idade		Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)	Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)
Plataforma	MT (s)	2,6±0,48	2,5±0,67	3,86±0,9	2,17±0,33
Alta Preta	DP	9,4%	13,6%	11,91%	7,7%
Plataforma	MT (s)	2,5±0,37	2,43±0,4	2,8±0,73	3,86±0,79
Alta Branca	DP	7,5%	8,3%	13,36%	10,5%
Plataforma	MT (s)	3,8±1,28	2,14±0,28	3,57±0,84	16±2,7
Baixa Preta	DP	17%	6,6%	12%	8,62%
Plataforma	MT (s)	2,2±0,39	2,71±0,56	2,43±0,4	2±0
Baixa Branca	DP	9,1%	10,5%	8,2%	0%

Tabela 6.11: Resultados da 2ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 30 dias de idade.

2ª Sessão		Controle		Experimental	
60 dias de Idade		Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)	Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)
Plataforma	MT (s)	2,62±0,35	2,22±0,29	2,86±0,67	2,25±0,32
Alta Preta	DP	7%	6,6%	11,9%	7,27%
Plataforma	MT (s)	2,78±0,54	2,4±0,43	5,4±1,18	2,12±0,24
Alta Branca	DP	10%	9,2%	11,11%	5,88%
Plataforma	MT (s)	3,25±1,15	3,9±1,88	3,75±0,94	3±1,05
Baixa Preta	DP	18,5%	24,3%	12,77%	17,82%
Plataforma	MT (s)	2,5±0,67	2,4±0,34	2,33±0,41	2,29±0,36
Baixa Branca	DP	13,6%	7,1%	9,04%	8,07%

Tabela 6.12: Resultados da 2ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 60 dias de idade.

2ª Sessão		Controle		Experimental	
90 dias de Idade		Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)	Machos (N=10)	Fêmeas (N=10)
Plataforma	MT (s)	2±0	1,6±0,32	2,2±0,32	2,4±0,52
Alta Preta	DP	0%	10,2%	7,27%	11,11%
Plataforma	MT (s)	2,1±0,56	1,8±0,39	2,33±0,33	1,9±0,19
Alta Branca	DP	7,1%	11,11%	7,14%	5,2%
Plataforma	MT (s)	1,78±0,29	3±1,51	2,44±0,34	2,4±0,58
Baixa Preta	DP	8,2%	25,8%	7,18%	12,2%
Plataforma	MT (s)	1,57±0,4	1,7±0,51	3,5±0,37	1,87±0,24
Baixa Branca	DP	12,8%	15,3%	5,4%	6,67%

Tabela 6.13: Resultados da 2ª sessão de testes do Labirinto Aquático para os ratos com 90 dias de idade.

pos médios dos animais na 1ª e 2ª sessões ao longo das etapas (30, 60 e 90 dias), porém não se observaram grandes discrepâncias para a latência quanto à altura das plataformas, apesar de alguns estudos apontarem que as plataformas submersas representarem um grau maior de dificuldade. Estes valores podem ser melhor avaliados segundo os histogramas exibidos nas Figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 a seguir.

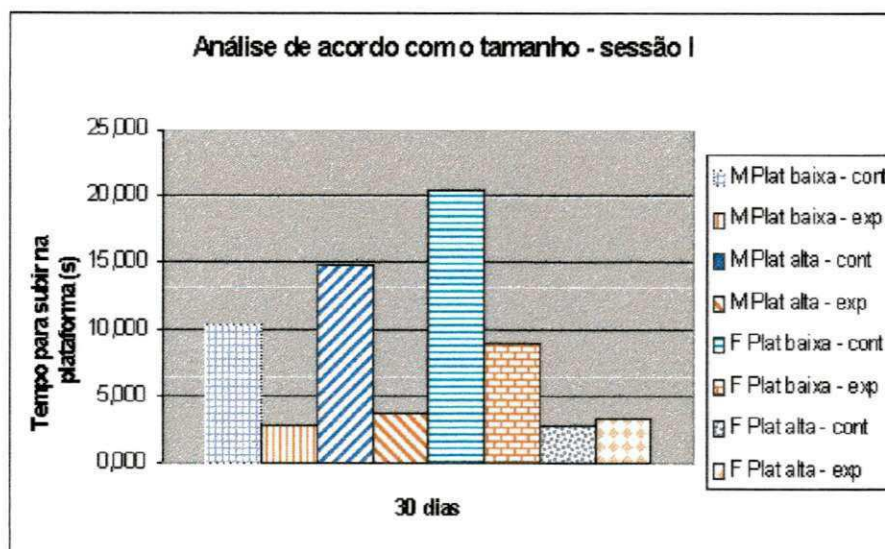


Figura 6.7: Análise quanto à altura das plataformas - 1ª Sessão (30 dias).

Considerando a cor das plataformas como elemento diferencial, ao analisar os dados, obtêm-se resultados similares aos fornecidos mediante a avaliação do tamanho das mesmas, não havendo alterações expressivas nos tempos entre os grupos experimental e de controle e, como consequência, não foram verificadas possíveis influências da radiação não-ionizante. Novamente observou-se uma redução na latência ao longo do tempo para as três etapas, entretanto a predominância de uma das cores sobre os tempos médios não se confirmou, sendo estes tempos muito próximos para as plataformas de cores diferentes. Este fato vai de encontro a algumas pesquisas que afirmam haver uma maior facilidade dos ratos em encontrar as plataformas pretas, sendo, tal comportamento, uma minoria neste estudo. Pode-se realizar uma melhor análise dos dados de acordo com os histogramas expostos nas Figuras 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 e 6.18.

Vale destacar que, nos testes com o labirinto aquático, as fêmeas demonstraram uma

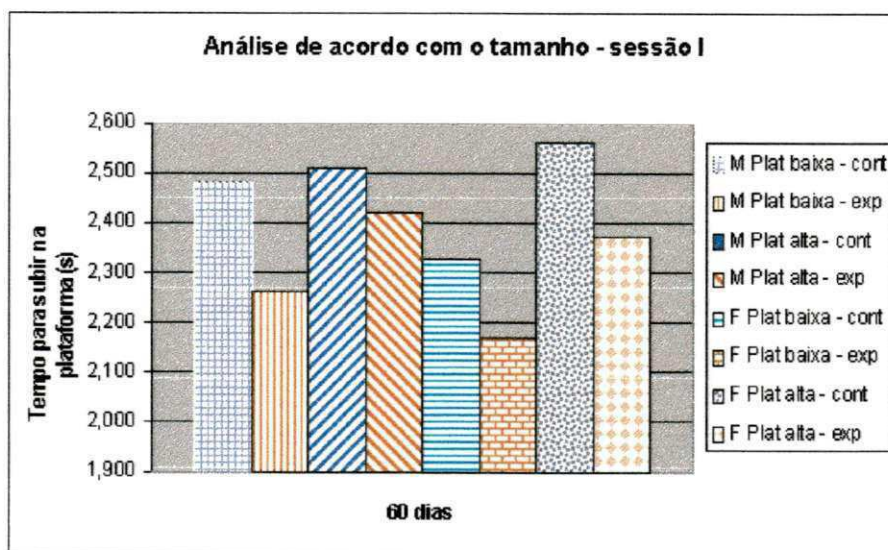


Figura 6.8: Análise quanto à altura das plataformas - 1ª Sessão (60 dias).

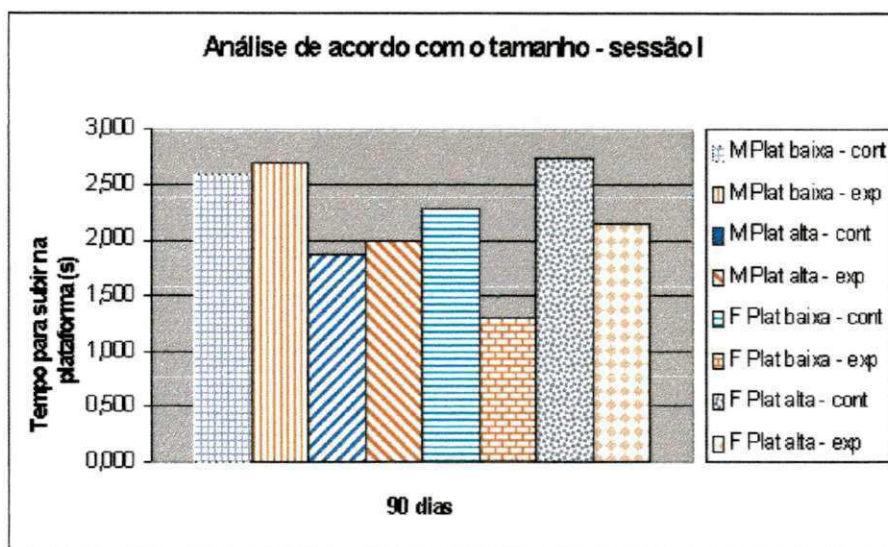


Figura 6.9: Análise quanto à altura das plataformas - 1ª Sessão (90 dias).



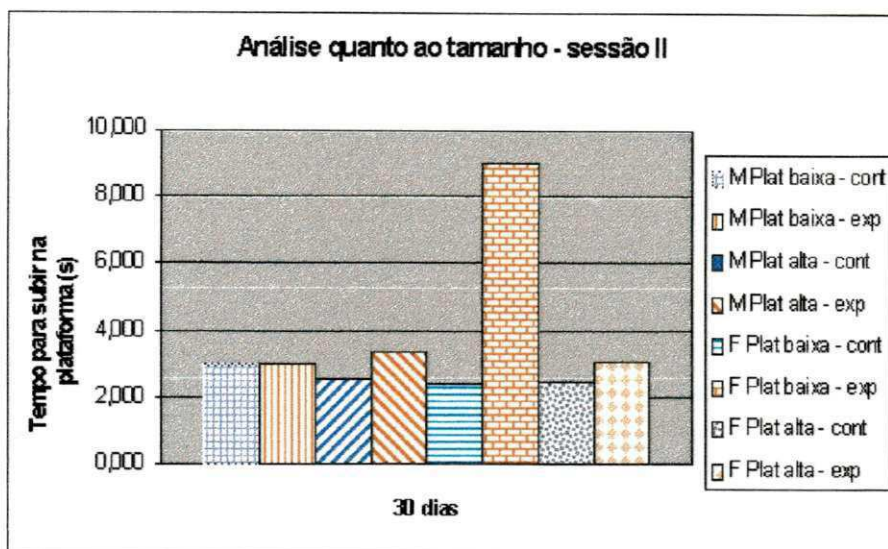


Figura 6.10: Análise quanto à altura das plataformas - 2ª Sessão (30 dias).

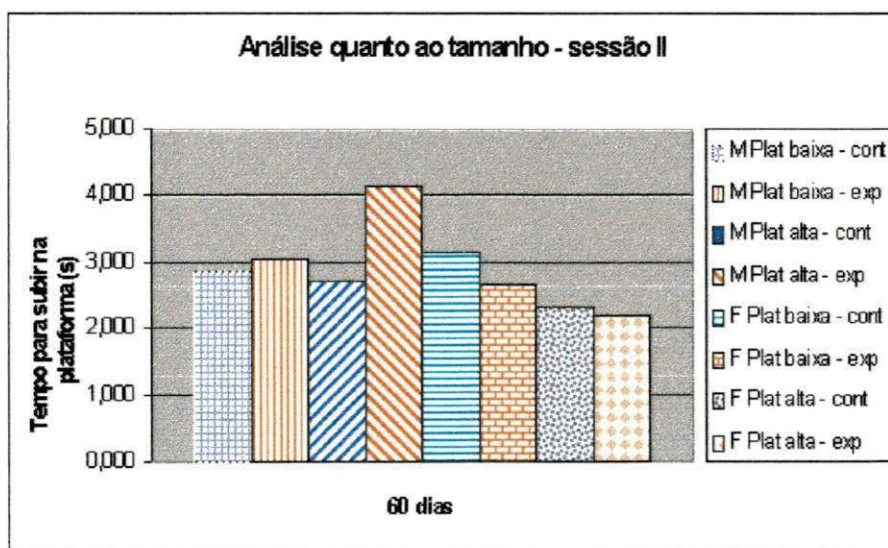


Figura 6.11: Análise quanto à altura das plataformas - 2ª Sessão (60 dias).



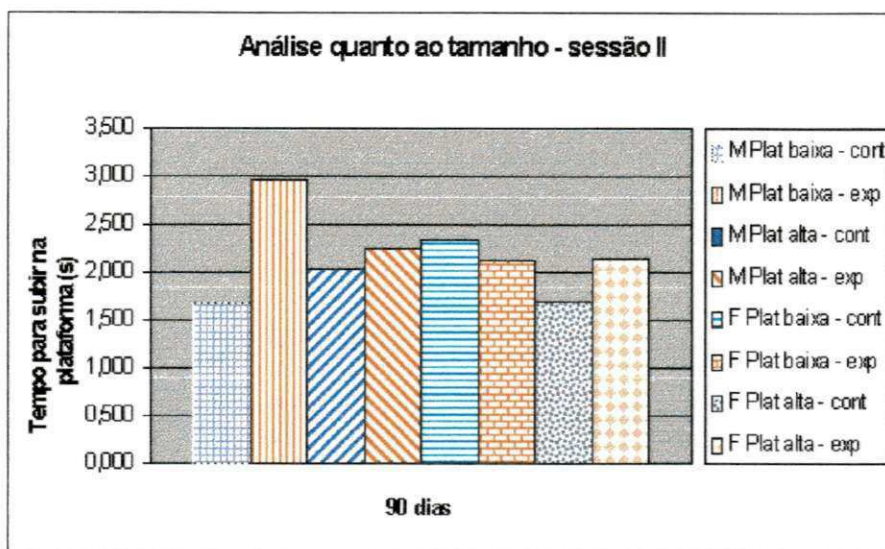


Figura 6.12: Análise quanto à altura das plataformas - 2ª Sessão (90 dias).

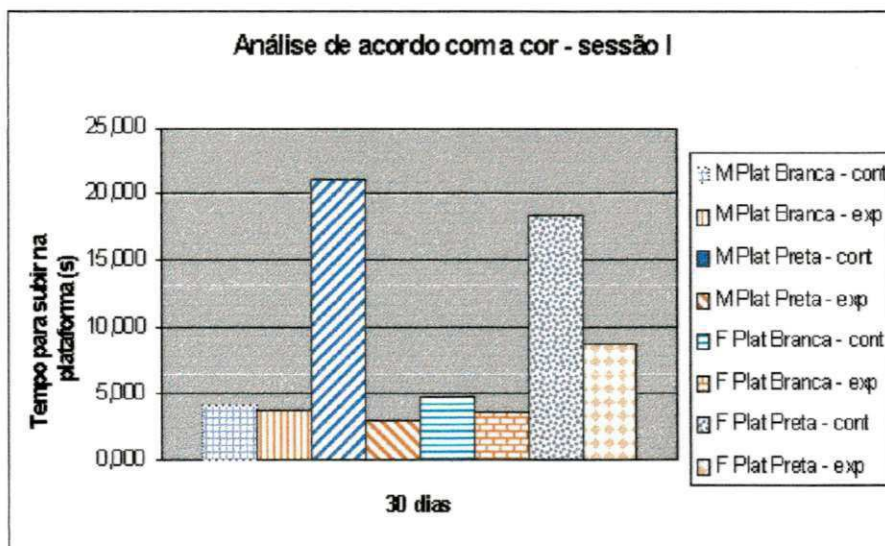


Figura 6.13: Análise quanto às cores das plataformas - 1ª Sessão (30 dias).

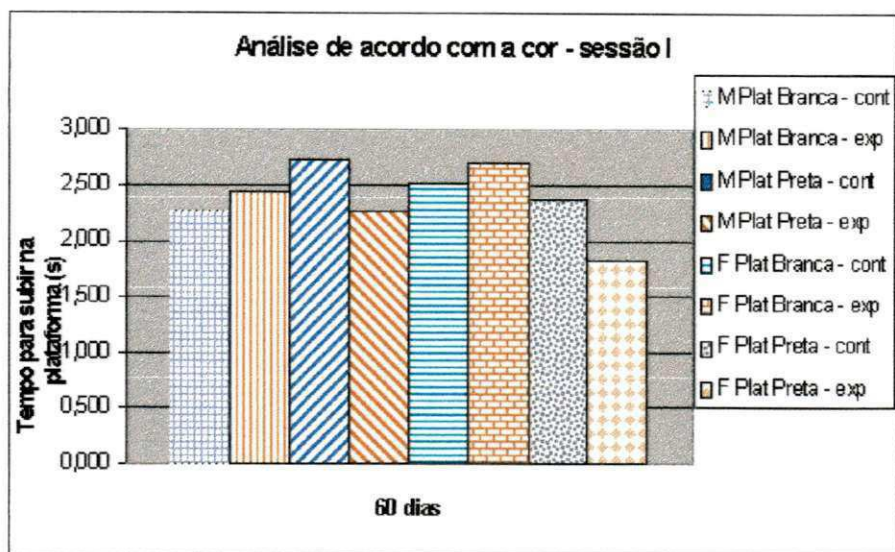


Figura 6.14: Análise quanto às cores das plataformas - 1ª Sessão (60 dias).

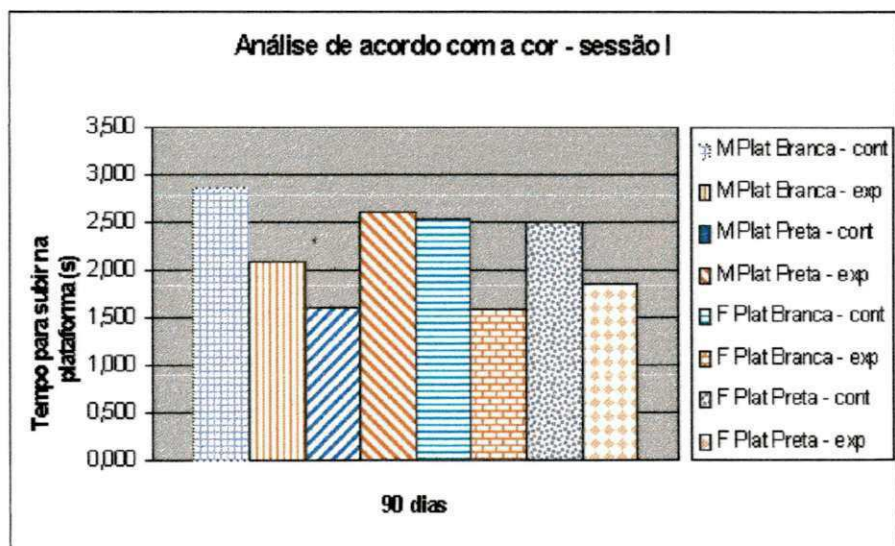


Figura 6.15: Análise quanto às cores das plataformas - 1ª Sessão (90 dias).

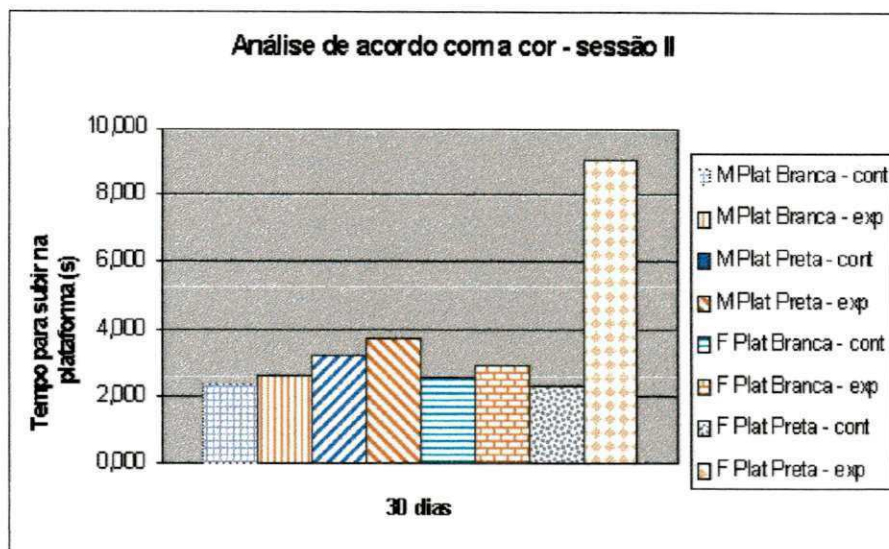


Figura 6.16: Análise quanto às cores das plataformas - 2ª Sessão (30 dias).

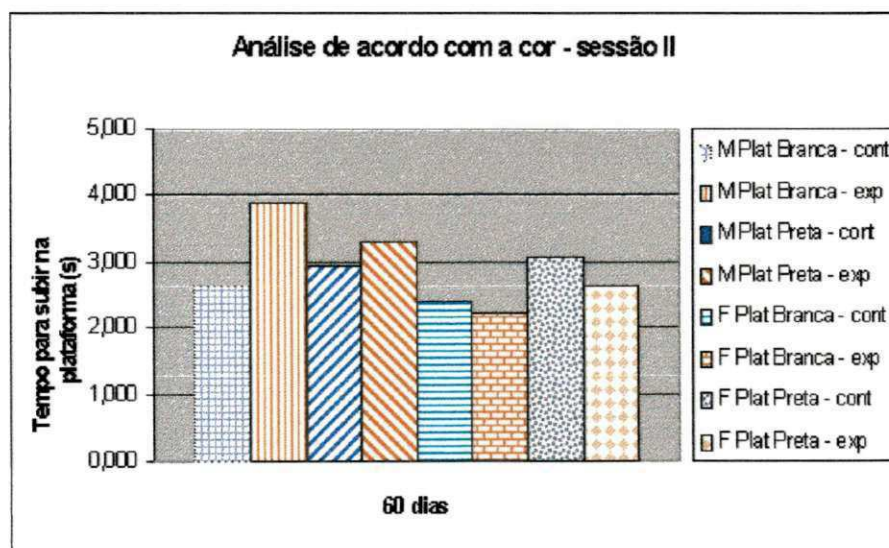


Figura 6.17: Análise quanto às cores das plataformas - 2ª Sessão (60 dias).

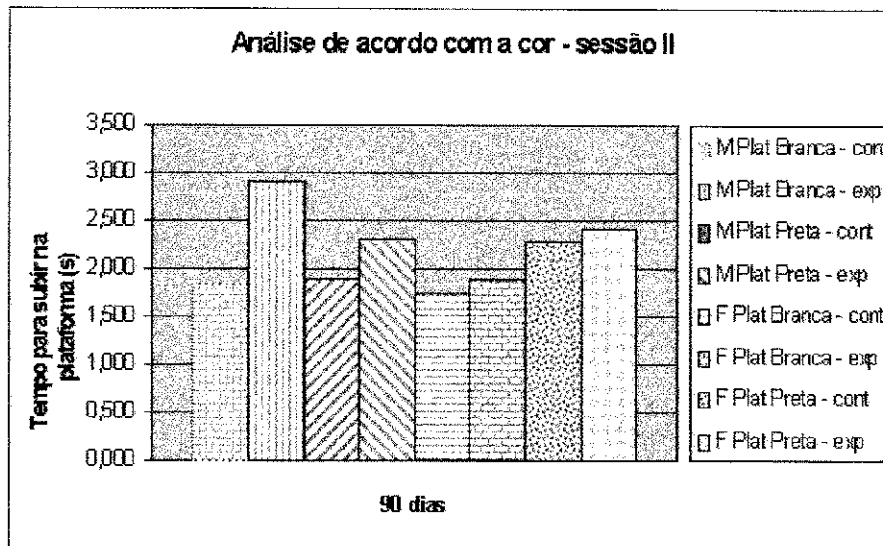


Figura 6.18: Análise quanto às cores das plataformas - 2ª Sessão (90 dias).

capacidade de aprendizagem análoga a dos machos e obtiveram desempenho similar ao deles, não sendo observadas grandes variações comportamentais nelas ao longo do tempo comparadas aos animais do sexo masculino.

## 6.4 Teste do Labirinto Elevado em Forma de Cruz

Com o teste do labirinto em cruz foi possível avaliar o nível de ansiedade e estresse do animal, por meio da frequência de entradas nos braços abertos pela frequência de entrada total nos braços (tanto abertos como fechados), e ainda o grau de movimentação e inibição deste, fornecido pela média de entrada nos braços. As Tabelas 6.14 e 6.15 mostram os resultados obtidos para os ratos com 30, 60 e 90 dias de vida.

Conforme pode-se notar, na maioria das vezes, os indivíduos do grupo de controle mostraram-se mais ativos e se movimentaram mais ao longo dos braços do labirinto que os ratos do grupo experimental, apresentando uma média de entrada nos braços mais elevada. Contudo, ao examinar a frequência 'abertos/total', percebe-se que os animais do grupo experimental, exceto as fêmeas com 60 dias, apresentaram valores bem mais elevados quando comparados aos do grupo de controle, com uma diferença



<b>Grupo Controle</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>Média de Entrada</b>	<b>Abertos/ Total</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	30	3,5±0,05	17,41%	13,73%
Machos (N=10)	60	4,55±0,03	19,47%	6,74%
	90	4,85±0,11	27,55%	20,8%
	30	6,35±0,05	20,49%	13,44%
Fêmeas (N=10)	60	9,2±0,05	28,95%	8,57%
	90	7,95±0,04	14,88%	13,59%

Tabela 6.14: Resultados do teste do Labirinto em Cruz para os sujeitos do grupo controle com 30, 60 e 90 dias de vida.

<b>Grupo Experimental</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>Média de Entrada</b>	<b>Abertos/ Total</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	30	2,85±0,09	44,65%	10,47%
Machos (N=10)	60	3,3±0,07	37,64%	8,99%
	90	2,35±0,12	37,83%	16,19%
	30	7,4±0,06	30,17%	9,43%
Fêmeas (N=10)	60	7,6±0,04	21,02%	9,3%
	90	9,3±0,10	32,9%	15,15%

Tabela 6.15: Resultados do teste do Labirinto em Cruz para os sujeitos do grupo experimental com 30, 60 e 90 dias de vida.

mínima de 32,08% para as fêmeas de 30 dias e máxima de 61,01% para os machos com 30 dias, significando assim um menor nível de ansiedade e estresse por parte dos ratos submetidos à radiação.

Um fator importante a ser considerado, visto que o uso do teste utilizando a radiação de microondas como diferencial é pioneiro, é o provável aquecimento dos sujeitos experimentais e, conseqüentemente, um possível aumento no consumo de água dos mesmos. Tal efeito pode motivar o deslocamento, até mesmo pelos braços abertos, onde o rato sente-se mais desprotegido, em busca de água.

Os resultados da taxa de 'abertos/total' para os dois grupos ao longo do tempo podem ser visualizados no histograma da Figura 6.19.

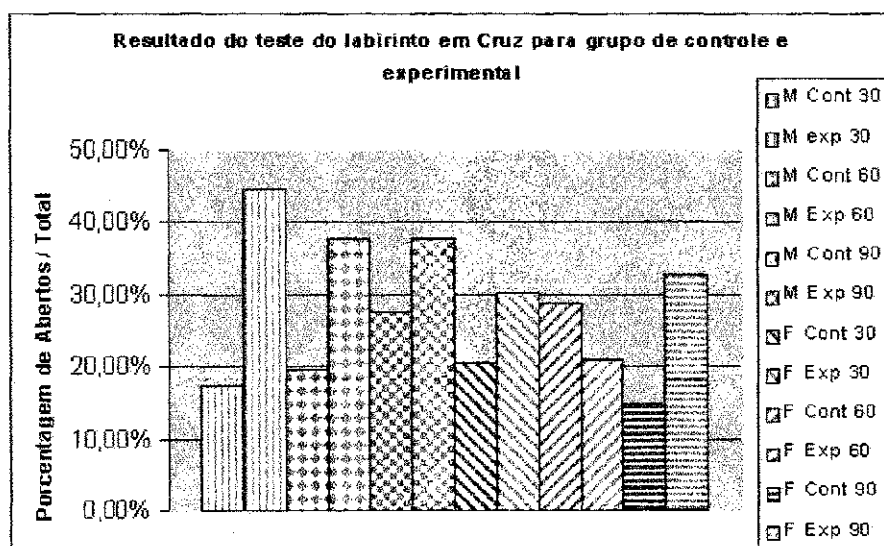


Figura 6.19: Taxa de 'abertos/total' para os animais com 30, 60 e 90 dias.

No labirinto elevado em forma de cruz, ao contrário do labirinto aquático, ocorreram diferenças no comportamento entre machos e fêmeas nos dois grupos. No decorrer das etapas, as fêmeas foram mais ativas que os machos, apresentando índices até três vezes maiores.

## 6.5 Gaiola de Skinner

O experimento da Gaiola de Skinner foi executado em uma série de sete exercícios com os ratos machos de 100 dias dos dois grupos (10 ratos do GC e 10 ratos do GE). O objetivo do teste é aprender a beber água no bebedouro após um período de 36 horas submetido à restrição de água. Os resultados obtidos com os testes estão dispostos a seguir.

- **Nível Operante**

Neste exercício, que avalia a frequência do comportamento antes do aprendizado, apesar dos indivíduos do grupo experimental se movimentarem muito na gaiola em busca de água e mostrarem-se mais sedentos, tanto no pré-teste (5 min) quanto nos 30 minutos, os ratos do grupo controle pressionaram mais a barra e, conseqüentemente, obtiveram mais água. As médias dos dados coletados encontram-se exibidas na Tabela 6.16.

Grupos	Controle		Experimental	
	5 min.	30 min.	5 min.	30 min.
Média de Pressionamentos	0,25±0,13	1,25±0,42	0±0	0,43±0,37
Desvio Padrão	18,75%	43,3%	0	49,48%

Tabela 6.16: Resultados do exercício de nível operante.

- **Treino ao Bebedouro**

No treino ao bebedouro, teste no qual o rato se aproxima do bebedouro para tomar água ao escutar seu som característico, só um animal do grupo de controle não conseguiu realizar o teste sendo retirado após o tempo máximo. Segundo os valores da Tabela 6.17, percebe-se, tanto para localização da 1ª gota quanto para o tempo necessário para beber 5 gotas consecutivas, os sujeitos do grupo controle foram mais rápidos. Quanto ao tempo gasto para beber as 20 gotas não consecutivas o grupo experimental foi mais ágil, eles se moviam mais pela gaiola enquanto os sujeitos do outro grupo ficavam sempre mais próximos ao bebedouro. No geral, a grande maioria passou para o teste seguinte sem maiores dificuldades.

Tempos	1 <sup>o</sup> Gota (s)		5 Gotas (min.)		20 Gotas (min.)	
	GC	GE	GC	GE	GC	GE
Média dos Tempos	1,75±0,4	5,5±0,7	1:51±9s	2:27±5s	25:33±46s	14:51±51s
Desvio Padrão	43,3%	50%	16,31%	7,2%	55,85%	60,85%

Tabela 6.17: Resultados do treino ao bebedouro.

- Modelagem

Observando a Tabela 6.18 e avaliando os resultados do teste da modelagem, cujo objetivo é fazer os sujeitos beberem água sem o auxílio do experimentador, verificou-se na primeira fase (tempo para beber seis gotas) uma redução de aproximadamente 59,44% na média de tempo do grupo experimental comparado ao de controle. Na segunda fase (60 gotas) a diferença entre os tempos dos dois grupos foi menor, cerca de 22,65%, mas novamente com os animais do grupo experimental realizando o exercício em um tempo menor.

Tempos	1 <sup>o</sup> Gota (s)		6 Gotas (min.)		60 Gotas (min.)	
	GC	GE	GC	GE	GC	GE
Média dos Tempos	3,5±0,5	2,25±0,4	13:14±5s	5:22±21s	20:54±19s	16:10±19s
Desvio Padrão	50%	43,3%	6,65%	25%	23,3%	22,5%

Tabela 6.18: Resultados do exercício da modelagem.

Durante os testes três indivíduos do grupo controle e um do experimental não pressionaram nenhuma vez a barra e não executaram o teste na 1<sup>a</sup> tentativa.

- Saciação

Na saciação, praticamente uma repetição da segunda fase de modelagem, houve uma inversão do resultado anterior e o grupo controle realizou o exercício cerca de 34,96% mais rápido que o grupo experimental. Um indivíduo de cada grupo não bebeu nenhuma gota de água, não concluindo assim o teste. Os dados do exercício estão expostos na Tabela 6.19 a seguir.

- Intervalo Variável



Tempos	1ª Gota (s)		60 Gotas (min.)	
	GC	GE	GC	GE
Média dos Tempos	3±0,8	1,3±0,4	10:53±2:19	16:44±2:51
Desvio Padrão	13,61%	14,34%	10,84%	8,68%

Tabela 6.19: Resultados do exercício da saciação.

Neste esquema de reforço intermitente, as gotas de água são fornecidas em intervalos de 20, 40, 10 e 50 segundos, totalizando um período de dois minutos, e registra-se o número de pressionamentos do indivíduo sobre a barra entre dois reforços consecutivos. O procedimento é repetido 20 vezes para cada rato. O número médio de pressionamentos nos intervalos de dois minutos para cada animal é dado na Tabela 6.20 a seguir.

Sujeitos	Pressionamentos do GC	Pressionamentos do GE
Rato 1	6,43	10,22
Rato 2	12,0	13,25
Rato 3	14,17	20,62
Rato 4	15,91	13,44
Rato 5	14,0	16,0
Rato 6	16,33	6,86
Rato 7	14,44	3,67
Rato 8	12,75	11,3
Rato 9	0	18,71
Rato 10	23,5	12,29
Média de Pressionamentos	14,20±0,2	13,34±0,13
Desvio Padrão	18,2%	9,5%

Tabela 6.20: Resultados do intervalo variável.

A média total de pressionamentos por grupo pode ser melhor observada mediante o gráfico da Figura 6.20.

A partir do gráfico verifica-se que o grupo de controle obteve uma média de reforços cerca de 6,06% mais elevada que a apresentada pelo grupo experimental.

- Discriminação (1ª Etapa)

O exercício da discriminação, cuja finalidade era verificar a influência do estímulo luminoso sobre a frequência de pressionamentos da barra não foi estabelecido

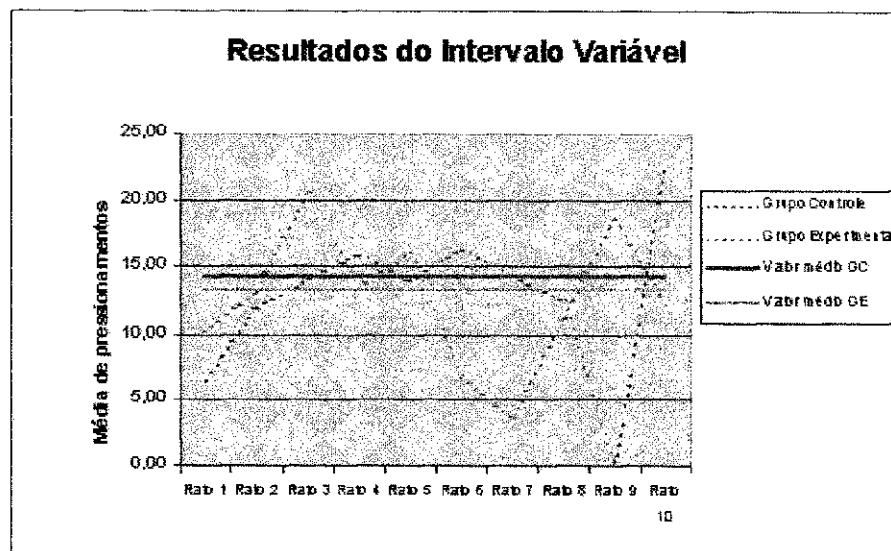


Figura 6.20: Resultados do intervalo variável.

pelos animais, tanto do grupo controle quanto do grupo experimental. Isto é, o número de resposta para os períodos com luz e sem luz foi praticamente igual e quando os sujeitos deixaram de pressionar a barra nos períodos de  $S^A$ , não pressionaram também no  $S^D$ .

- Extinção

No experimento da extinção, o objetivo era perceber o mais cedo possível a ausência do reforço e levar menos tempo até passar 10 minutos consecutivos sem pressionar a barra. Este objetivo foi atingido em 43:47s pelo grupo controle e em 58:30s pelo grupo experimental. Os dados podem ser visualizados na Tabela 6.21.

Tempos	1ª Gota (s)		10 Gotas (min.)		10 min. sem Pressionar	
	GC	GE	GC	GE	GC	GE
Média dos Tempos	1,5±0,4	3,6±0,43	2:03±6s	1:51±9s	43:17±21s	58:30±42
Desvio Padrão	50%	48,9%	8,69%	17,19%	25%	50%

Tabela 6.21: Resultados do exercício da extinção.

Os resultados também foram expressos no gráfico da Figura 6.21.

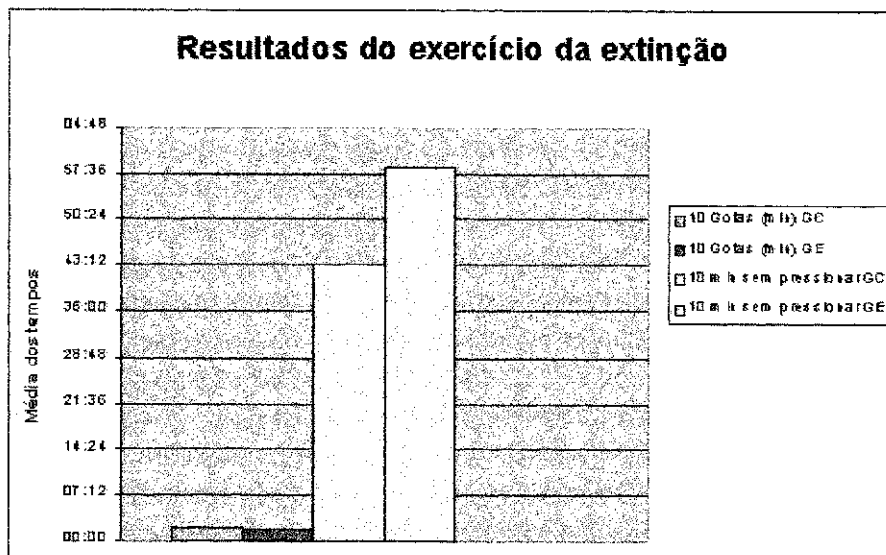


Figura 6.21: Histograma com os resultados da extinção .

- Discriminação (2ª Etapa)

Passados 10 dias do término da bateria de exercícios e estando os animais bem modelados, optou-se por repetir um exercício de aprendizagem para verificar o desempenho dos sujeitos. Repetiu-se então o teste da discriminação, conforme estava previsto e, adicionalmente, pelo fato dele ter sido o único a não ser estabelecido na etapa anterior. Os resultados obtidos na segunda etapa são exibidos na Tabela 6.22.

Grupos	Controle		Experimental	
	S <sup>D</sup>	S <sup>Δ</sup>	S <sup>D</sup>	S <sup>Δ</sup>
Média de Pressionamentos	15,74±0,23	17,8±0,25	14,04±0,35	14,13±0,45
Desvio Padrão	28,51%	26%	36%	46,04%

Tabela 6.22: Resultados da segunda etapa do exercício da discriminação.

Mais uma vez a discriminação não foi estabelecida e a frequência das respostas nos períodos S<sup>D</sup> e <sup>Δ</sup> foram muito próximas para os dois grupos, em especial para o grupo experimental no qual a diferença foi de 0,64% contra 11,57% para o grupo de controle. Vale ressaltar ainda que nos dois grupos a maior média de respostas

ocorreu no  $S^{\Delta}$ . Nesta segunda etapa porém, alguns animais já conseguiram parar de pressionar no  $S^{\Delta}$ , continuando a pressionar no  $S^D$ , diferentemente do ocorrido na primeira etapa.

Mesmo tomando-se todas as precauções necessárias no tocante a preparação do ambiente a fim de evitar interferências de variáveis externas (luminosidade em especial) durante os exercícios de discriminação, devido à luz das gaiolas não ser tão intensa, existe a possibilidade da claridade no laboratório estar dificultando a distinção da presença ou ausência de luz por parte dos sujeitos. Sendo assim, com o objetivo de superar o possível problema, para os próximos testes serão construídas caixas de madeira abertas na frente onde as gaiolas ficarão depositadas, acentuando a diferença na luminosidade entre os períodos de  $S^D$  e  $S^{\Delta}$  e facilitando a discriminação dos ratos.

## 6.6 Conclusões

Este capítulo apresentou uma análise detalhada de todos os resultados obtidos com as experiências comportamentais. Dentre os resultados observados é possível citar um aumento do consumo de água dos animais do grupo experimental; ausência de diferenças significativas no aprendizado entre machos e fêmeas do grupo de controle e grupo experimental no labirinto aquático, exceto para a primeira tentativa da primeira etapa dos treinos, quando os ratos do grupo experimental demonstraram maior sensibilidade ao estímulo cognitivo que os sujeitos do grupo controle e obtiveram um melhor desempenho; uma maior atividade locomotora dos ratos do grupo de controle no labirinto em cruz, entretanto um menor nível de estresse por parte dos sujeitos do grupo experimental e, por fim, nos testes com a gaiola de Skinner, nos exercícios de aprendizagem, os indivíduos do grupo de controle apresentaram melhor desempenho, exceto para o exercício da discriminação que não foi estabelecido por nenhum animal dos dois grupos.

# Capítulo 7

## Conclusão

No presente trabalho, foi realizada e desenvolvida uma série de experimentos em laboratório visando avaliar possíveis efeitos comportamentais decorrentes da radiação de microondas na frequência de operação de aparelhos celulares em sujeitos da espécie *Rattus norvegicus*. Dando continuidade a estudos efetuados, foi executada a automatização de experimentos já existentes bem como a introdução de novos testes, montando-se um circuito de experimentos comportamentais. É importante ressaltar, como diferencial em relação aos trabalhos anteriores, a utilização de equipamentos mais precisos, tanto em termos da frequência de operação quanto do ajuste do nível de potência emitido para a irradiação dos sujeitos. Finalmente, um outro aspecto relevante foi o tratamento estatístico aplicado aos dados. Devido ao número ainda reduzido de ratos e à grande variabilidade nas medidas coletadas para cada um deles, apesar da impossibilidade de realizar um modelamento do comportamento dos animais usando funções (curvas) matemáticas conhecidas, foi adotado um índice de confiabilidade de 95% para o tratamento das medidas, o que permitiu, em grande parte dos dados, a obtenção de desvios padrões razoáveis, na faixa de 10 a 20%.

No início dos estudos, os animais foram divididos em dois grupos: controle, isentos de exposição à radiação; e experimental, submetidos durante uma hora diária, desde a gestação, à radiação não-ionizante na frequência de 850 MHz, com uma densidade de potência de  $0,6 \text{ mW/cm}^2$ . A escolha do valor de 850 MHz está relacionada ao fato de telefones celulares usarem portadoras de RF entre 800 e 900 MHz para as bandas

'A' e 'B' no Brasil. Dentre os testes comportamentais executados ao longo da pesquisa pode-se citar o experimento com labirinto aquático (tanque de Morris), teste com o labirinto em cruz e o experimento com a gaiola de Skinner, sendo o primeiro e o último desenvolvidos para examinar a aprendizagem dos sujeitos e o segundo utilizado na análise do grau de ansiedade e estresse. Em paralelo, efetuou-se ainda a pesagem dos animais e a monitoração do consumo de água e ração.

Embora os testes sejam realizados com ratos, face à inviabilidade de efetuar testes desta natureza em seres humanos, é importante salientar que os resultados obtidos com o estudo podem ser extrapolados por meio de cálculos dosimétricos para os possíveis resultados esperados em humanos.

No decorrer dos experimentos, alguns valores apontaram diferenças significativas entre os indivíduos do grupo de controle e grupo experimental, como a maioria dos exercícios com a gaiola de Skinner, os testes com o labirinto em cruz e a monitoração do consumo de água. Outros resultados, entretanto, não apresentaram diferenças significativas entre os dois grupos, como foi o caso do labirinto aquático, pesagem dos animais e consumo de ração.

A respeito da elevação no consumo de água por parte dos sujeitos do grupo experimental em relação ao grupo controle, embora não tenha sido medido o grau de aquecimento dos indivíduos e da literatura indicar um grau de aquecimento relativamente baixo para a exposição à radiação nesta faixa de frequência, pode-se levantar a possibilidade de que esta elevação esteja relacionada ao aquecimento provocado pela radiação de microondas à qual estão submetidos.

Analisando os resultados dos testes com o labirinto aquático, de forma geral, não foram detectadas alterações expressivas no desempenho e comportamento dos ratos ao comparar os dois grupos, exceto para a primeira tentativa da primeira etapa dos treinos, quando os ratos do grupo experimental demonstraram maior sensibilidade ao estímulo cognitivo que os sujeitos do grupo controle e obtiveram um melhor desempenho. Não foram verificadas também grandes diferenças no comportamento dos machos em relação às fêmeas de ambos os grupos. Todos os animais executaram os testes e demonstraram uma evolução do aprendizado ao longo do tempo, tornando difícil a verificação de alguma influência da radiação neste tipo de exercício. Não foram observadas também

influências da altura e das cores das plataformas em relação ao desempenho dos ratos.

Quanto ao labirinto em cruz, alguns resultados foram surpreendentes. Avaliando a movimentação no labirinto e a atividade locomotora, os ratos do grupo controle mostraram-se mais ativos e obtiveram um melhor desempenho. A respeito da taxa de entrada nos braços abertos pela entrada total nos braços, o grupo experimental, na grande maioria das vezes, apresentou melhores resultados, chegando a alcançar uma diferença máxima de 61,01% neste valor quando comparado ao dado correspondente para os indivíduos de controle. Vale destacar também que, o fato dos ratos do grupo experimental consumirem mais água, mostrando-se mais sedentos, pode estimulá-los a percorrer os braços, inclusive os abertos, onde ficam mais desprotegidos, em busca de água. Outro aspecto importante registrado nos testes foi a grande movimentação das fêmeas, de ambos os grupos, comparada aos machos, apresentando índices que atingem até mesmo o triplo daqueles alcançados pelos animais do sexo masculino. A ocorrência deste fato, muito provavelmente, deve-se a característica das fêmeas de diversas espécies de irem em busca de alimentos.

No tocante aos sete exercícios com a gaiola de Skinner, apesar de três sujeitos do grupo controle não terem conseguido estabelecer a modelagem na primeira tentativa, contra um animal apenas do grupo experimental, em geral, nos testes de condicionamento, os dois grupos realizaram as atividades pré-estabelecidas. Nos testes finais, de avaliação do aprendizado e da percepção dos animais, os indivíduos do grupo controle apresentaram um desempenho superior em relação ao grupo experimental. Tais resultados levantaram a possibilidade de, neste experimento específico, a radiação de microondas ter afetado a aprendizagem dos ratos a ela submetidos, mesmo sendo observado ao longo dos experimentos que as características individuais dos animais tiveram um peso relativamente alto nos resultados quando comparado ao peso da influência da radiação.

Apesar da variabilidade de resultados obtida de um experimento para outro, de um modo geral, durante a realização dos testes comportamentais não foram evidenciadas influências expressivas da radiação de microondas sobre o desempenho dos sujeitos, diferente dos resultados obtidos em estudos desenvolvidos no LABCOM anteriormente nos quais nítidos efeitos da exposição à radiação foram observados [5].

Uma vez que este trabalho veio dar continuidade a estudos já desenvolvidos, devido à manifestação de resultados não coincidentes aos anteriores, embora a faixa de frequência da radiação de microondas usada seja diferente nos dois trabalhos, faz-se necessário prosseguir e aprofundar a pesquisa visando esclarecer algumas dúvidas, obter uma regularidade nas medidas e, conseqüentemente, chegar a resultados mais definitivos. Dentre os questionamentos levantados após o término dos experimentos tem-se: O aquecimento ocasionado pela radiação de microondas é suficiente para provocar o aumento do consumo de água por parte dos ratos irradiados? É possível que a manifestação da influência da radiação de radiofrequência só possa ser verificada em testes mais complexos, como o teste da gaiola de Skinner? A diferença na frequência da radiação utilizada no trabalho atual em relação a usada no trabalho anterior é a responsável pelas modificações nos resultados das duas pesquisas? A partir de que nível de potência os efeitos comportamentais tornam-se notórios?

Mesmo utilizando uma amostra de sujeitos maior que a usada em trabalhos passados, um ponto crucial ao longo do estudo foi o número ainda restrito de medidas e uma variação relativamente elevada entre os dados coletados para diferentes animais. Diante disto, torna-se imprescindível aumentar o número de ratos durante os testes no intuito de se obter valores mais confiáveis. Houve dificuldades também com relação ao tempo gasto para executar alguns testes, especialmente os experimentos com a gaiola de Skinner, que são extremamente demorados.

Por fim, deve-se salientar que os efeitos verificados nos ratos para uma radiação de microondas na frequência de 850 MHz e submetidos a uma densidade de potência de  $0,6 \text{ mW/cm}^2$  só podem ser observados em seres humanos sujeitos à radiação nesta frequência para valores de densidades de potência iguais ou superiores a  $26,25 \text{ mW/cm}^2$  ou ainda para uma frequência de 98 MHz com densidades acima de  $13,33 \text{ mW/cm}^2$ . Estes valores de densidade de potência são bem superiores aos limites determinados pelas normas para ambientes não-controlados que estabelecem cerca de  $0,6 \text{ mW/cm}^2$  para uma radiação na frequência de 850 MHz (sistemas analógicos) e de aproximadamente  $1,2 \text{ mW/cm}^2$  para a frequência de 1,8 GHz (sistemas de terceira geração).



## 7.1 Perspectivas para Trabalhos Futuros

Face aos resultados expostos neste trabalho sobre os efeitos comportamentais da radiação não-ionizante serem preliminares e não apresentarem ainda a regularidade desejável, torna-se necessário dar seguimento à pesquisa aumentando o número de sujeitos experimentais, adquirindo mais equipamentos para os testes e também implementando mais experimentos para análises de comportamento. Além disso, é preciso medir o grau de aquecimento nos animais e avaliar as conseqüências sobre eles, bem como determinar o nível de potência a partir do qual os efeitos comportamentais sejam verificados.

O aumento da quantidade de ratos a serem usados nos testes é essencial para a obtenção de dados mais confiáveis e definitivos. Para tanto, apesar da maioria dos experimentos estar automatizada, a aquisição de novos equipamentos para execução de determinados experimentos (principalmente os exercícios com a gaiola de Skinner) é imprescindível na otimização do tempo gasto, contribuindo para agilizar a realização dos testes.

Na intenção de colaborar com o desenvolvimento da pesquisa, é válido ampliar o número de exercícios comportamentais, complementando o circuito de testes. Duas sugestões de experimentos a serem desenvolvidos seriam o teste claro/escuro e o teste da atividade locomotora.

O teste claro/escuro é utilizado para avaliação emocional dos animais. Nele, os indivíduos são colocados em uma espécie de caixa de madeira sendo metade dela coberta com a própria madeira e a outra metade descoberta, dividindo o ambiente interno da caixa em uma parte mais clara e outra mais escura. O sujeito fica na caixa por um período e registra-se quanto tempo, do período total, ele passou na parte clara e quanto tempo ele permaneceu na parte escura. O fato do rato passar mais tempo na parte coberta indica uma certa 'perturbação' emocional. Já o teste da atividade locomotora tem por finalidade avaliar a atividade locomotora do animal como também a elevação dele na caixa experimental por meio de sensores localizados ao longo do seu comprimento. Os sensores ficam dispostos em dois níveis, um próximo ao piso da caixa e outro um pouco acima da metade da mesma.

Os dois testes sugeridos são usados para análise de comportamento em indivíduos

submetidos à restrição de dieta. Os resultados geralmente apresentam, para o primeiro teste, um tempo de permanência maior dos animais desnutridos na parte escura e, para o segundo teste, uma maior atividade locomotora e de elevação por parte dos sujeitos do grupo experimental comparados aos do grupo controle. O último comportamento é justificado devido ao fato dos animais desnutridos, mais famintos, se movimentarem mais em busca de comida.

Paralelamente às atividades citadas, o melhoramento das instalações laboratoriais como um todo deverá continuar a fim de se ter condições cada vez mais apropriadas para estas atividades.

Com a chegada dos aparelhos celulares de terceira geração no Brasil e sendo a frequência de operação destes aparelhos bem próxima a usada nos primeiros trabalhos desta linha de pesquisa, é interessante examinar os efeitos comportamentais empregando uma outra fonte geradora de microondas operando na faixa de frequência utilizada pelo GSM (entre 1,8 e 1,9 GHz).

Finalmente, com o objetivo de contribuir para o estabelecimento de normas de segurança para exposição a este tipo de radiação, sugere-se a realização de estudos destinados a identificar níveis de potência perigosos, a partir dos quais os efeitos comecem a surgir. Uma cooperação com a Anatel está sendo tentada neste sentido.

# Apêndice A

## Conceitos Básicos de Estatística

A estatística pode ser entendida como o ramo da ciência que lida com dados obtidos por meio de contagem ou medição das propriedades da população de um fenômeno natural. A definição “fenômeno natural” inclui todos os acontecimentos do mundo exterior, sejam humanos ou não [67].

As definições de probabilidade são geralmente apresentadas por meio de três enfoques: a abordagem clássica, o enfoque por frequência relativa e a abordagem axiomática [68]. Apesar de alguns problemas de convergência nas séries de experimentos presentes na abordagem por frequência relativa, este será o enfoque adotado neste trabalho por melhor se adequar ao formato dos dados obtidos nas experiências.

### A.1 Distribuição de frequência

Considere os membros de uma população cada um relacionado a um valor numérico de uma variável. Se ela assume apenas um número isolado de valores será chamada de **discreta**, e se ela pode assumir qualquer valor dentro de um intervalo contínuo, será denominada **contínua**. A população corresponderá então ao conjunto de variáveis-valores e suas propriedades é que serão analisadas.

Caso a população seja pequena, com poucos membros, pode-se considerar as variáveis-valores exibidas por ela; mas se, como ocorre comumente, ela é muito grande, o conjunto de variáveis-valores é dividido em intervalos, podendo os últimos serem de

tamanhos iguais ou não. Os intervalos recebem o nome de **classes de intervalos** e o número variáveis-valores dentro de cada classe é chamada **classe de freqüências**. A maneira como as classes de freqüências se distribuem pelas classes de intervalos é denominada **distribuição de freqüências**. A distribuição de freqüência pode também ser representada graficamente mediante uma curva chamada Polígono de Freqüência ou pelo Histograma.

Na grande maioria dos casos, a população examinada é apenas uma parte da grande população na qual está centrada o interesse principal, denominada população hipotética, e a observação da distribuição obtida por meio desta é fundamental para inferências estatísticas. A distinção entre o universo existente e o hipotético não é meramente um ponto de especulações, mas uma prática importante ao lançar-se inferências sobre a população cujas amostras foram analisadas.

## A.2 Função Freqüência e Função Distribuição

Define-se a **Função Freqüência** como a freqüência,  $p(x)$ , dos valores que a variável, representada por  $x$ , pode assumir.

Para variáveis contínuas, suponha que no intervalo  $\Delta x$ , não muito pequeno, com limites  $\pm \Delta x$  centrado em  $x$ , a distribuição seja especificada pela função  $p(x)\Delta x$ . A função freqüência para variáveis contínuas pode ser escrita como

$$dP = p(x)dx \quad (\text{A.1})$$

expressando que o elemento de freqüência  $dP$  entre  $x - (1/2)dx$  e  $x + (1/2)dx$  é  $p(x)dx$ , para todo  $x$  e para  $dx$ , por mais que seja pequeno.

Seja  $P(x)$  uma função de  $x$  definida em todos os pontos de um intervalo contínuo, exceto talvez num número pequeno de pontos, e não decrescente em todos os pontos. Tem-se  $P$  sendo zero no menor ponto do intervalo (por exemplo  $-\infty$ ) e assumindo um valor constante  $N$  no ponto máximo do mesmo (por exemplo  $+\infty$ ). Tal função é chamada de Função Distribuição e corresponde ao acúmulo de freqüência da distribuição, para uma freqüência total  $N$ . Caso existam pontos de descontinuidade em  $P(x)$  tais pontos são denominados "saltos".

Se não há saltos no intervalo,  $P(x)$  é contínua e monotonicamente crescente em toda sua extensão, e caso ela possua derivada tem-se a equação diferencial

$$dP = P'(x)dx = p(x)dx, \quad (\text{A.2})$$

correspondendo a Equação A.1, em que  $f(x)$  é a Função Freqüência.

Sendo a função freqüência  $p(x)$  descontínua,  $P(x)$  é considerada como a freqüência total para valores menores ou iguais a  $x$  da forma

$$P(x_r) = \sum_{j=1}^r p(x_j). \quad (\text{A.3})$$

No caso contínuo,

$$P(x_r) = \int_a^x dP = \int_a^x p(u)du, \quad (\text{A.4})$$

para o intervalo de  $a$  até  $b$ .

Duas convenções serão introduzidas e simplificarão as expressões anteriores. Sabendo que as expressões de freqüência sempre exprimem uma proporção da freqüência total e sendo esta última unitária, a soma ou integral da função freqüência sobre todo o intervalo será um, isto é,  $P(b) = 1$ . O outro ponto é, com os limites do intervalo sendo  $a$  e  $b$ ,  $P(x)$  e  $p(x)$  são zero para todo  $x$  menor que  $a$  e  $P(x) = 1$  e  $p(x) = 0$  para qualquer  $x$  maior que  $b$ . Assim, pode-se escrever

$$P(x_r) = \sum_{j=-\infty}^r p(x_j), \quad (\text{A.5})$$

$$P(x) = \int_{-\infty}^x p(u)du. \quad (\text{A.6})$$

e também

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} p(x_j) = P(\infty) - P(-\infty) = 1, \quad (\text{A.7})$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(u)du = P(\infty) - P(-\infty) = 1. \quad (\text{A.8})$$

Em que, levando em conta a freqüência total  $N$ , deve-se multiplicar por  $N$  as freqüências dadas pela função  $f(x)$ .

### A.3 Distribuições Multivariáveis

Todo o procedimento já desenvolvido pode ser generalizado incluindo populações nas quais são consideradas duas ou mais variáveis, levando a distribuições bivariáveis, tri-variáveis, ..., multivariáveis. Numa distribuição bivariável, as freqüências expostas nas margens da tabela fornecem a distribuição das duas medidas consideradas separadamente, e o corpo da mesma exibe como elas variam juntas. Para representar graficamente uma distribuição bivariável, o Polígono de Freqüência e o Histograma são construídos em três dimensões.

A distribuição bivariável com as variáveis  $x_1$  e  $x_2$  pode ser escrita como

$$dP = p(x_1, x_2)dx_1dx_2. \quad (\text{A.9})$$

A função distribuição para duas variáveis, segundo a convenção utilizada, será dada então por

$$P(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{x_1} \int_{-\infty}^{x_2} p(u_1, u_2)du_1du_2, \quad (\text{A.10})$$

realizando-se uma integração, se  $p(x_1, x_2)$  for contínua, ou reduzindo-se a um somatório, se  $p(x_1, x_2)$  for discreta.

Para um valor fixo de uma das variáveis, por exemplo  $x_2 = k$ , ter-se-á então uma distribuição univariável em relação a  $x_1$ . Neste caso, a fim de confirmar que freqüência total será unitária utiliza-se a expressão

$$dP_0(x_1) = \frac{p(x_1, k)dx_1}{\int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, k)dx_1}, \quad (\text{A.11})$$

conhecida como distribuição condicional de  $x_1$  para  $x_2 = k$ .

A soma dos valores marginais fornecem a distribuição de freqüência de cada variável isoladamente. Para algum valor de  $x_2$  a freqüência total é obtida somando-se todos os valores de  $x_1$  a fim de fornecer a freqüência para cada  $x_2$ . Portanto, se a distribuição

de freqüência bivariável é representada por  $P(x_1, x_2)$ , as distribuições univariáveis de  $x_1$  e  $x_2$  respectivamente são dadas por  $P(x_1, \infty)$  e  $P(\infty, x_2)$ . Em termos da função freqüência tem-se

$$dP_1(x_1) = \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, x_2) dx_2 \right\} dx_1, \quad (\text{A.12})$$

$$dP_2(x_2) = \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, x_2) dx_1 \right\} dx_2. \quad (\text{A.13})$$

que são chamadas de distribuições “marginais”.

Estes conceitos podem ser estendidos para distribuições com um número maior de variáveis.

## A.4 Medidas de Localização e Dispersão

As distribuições de freqüência possuem as mais variadas naturezas, podendo ser ou não simétricas, apresentarem um único máximo (unimodal) ou diversos máximos, entre outras características. Em trabalhos estatísticos normalmente deseja-se comparar duas distribuições. Se elas não são do mesmo tipo fazer alguma comparação é muito mais difícil, porém, caso elas sejam do mesmo tipo, deve-se estar hábil para realizar tal tarefa examinando suas principais características. Para tanto, algumas medidas de localização e dispersão são comumente utilizadas.

### Medidas de Localização

Existem três grupos de medidas de localização freqüentemente usadas: as médias aritmética, geométrica e harmônica, a mediana e valor modal, sendo a média aritmética a medida estatística mais geralmente utilizada dentre elas.

- Média Aritmética

Se a freqüência proporcional ao valor  $x$  de uma distribuição é  $p(x)$ , a média aritmética  $\mu$  em torno do ponto  $x = a$  é definida por

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} (x - a)p(x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} (x - a)dP. \quad (\text{A.14})$$

A média aritmética para um conjunto de valores discretos  $x$  é a soma dos valores dividida pelo número valores. O cálculo da média aritmética para uma distribuição numérica específica é um processo simples. Se há um número relativamente pequeno de valores na população é necessário apenas somar os valores e dividir pelo número total  $N$ . Se os dados forem exibidos por meio de uma tabela de freqüência, um procedimento mais formal é desejável mas o princípio é exatamente o mesmo.

- Mediana

O valor mediano é o valor da variável que divide a freqüência total pela metade, ou seja, é o valor  $\mu_e$  tal que

$$\int_{-\infty}^{\mu_e} p(x)dx = \int_{\mu_e}^{\infty} p(x)dx = \frac{1}{2} \quad (\text{A.15})$$

Quando a distribuição é discreta existe uma pequena indeterminação que pode ser removida. Se existirem  $(2N + 1)$  membros na população, o valor mediano será o valor do membro  $(N + 1)$ , porém se existirem  $(2N)$  membros deve-se considerar o valor intermediário entre o  $n$ -ésimo e o  $(n + 1)$ -ésimo membros. Quando a distribuição é numericamente especificada por meio de classe de intervalos existe uma indeterminação usual devido ao agrupamento, podendo ser tratada conforme o exemplo a seguir.

- Valor Modal

O Valor Modal é o valor da variável que é exibido pelo maior número de membros da distribuição. Se a função freqüência é contínua e diferenciável, ele é dado pela solução das equações

$$\begin{aligned} p'(x) &= \frac{d}{dx}p(x) = 0, \\ p''(x) &= \frac{d^2}{dx^2}p(x) < 0. \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Se  $p'(x)$  for zero e  $p''(x)$  for maior que zero tem-se um mínimo comumente chamado de "antimodo".



Em distribuições discretas ou especificadas por uma tabela de freqüências, muitas vezes é difícil determinar o valor modal exato. Por exemplo, se uma distribuição consiste meramente em valores numéricos isolados, cada um ocorrendo apenas uma vez, não existirá valor modal segundo a definição adotada. Nas distribuições em que o número de valores é grande o bastante para permitir a formação de grupos de intervalos, o intervalo contendo a freqüência máxima conterá o pseudo-modo.

Quando as distribuições são simétricas, média, mediana e valor modal coincidem, caso contrário, considerando a distribuição unimodal, existe uma relação empírica entre essas três medidas.

$$\text{média-valor modal} = 3(\text{média-mediana}) \quad (\text{A.17})$$

### **Medidas de Dispersão**

As Medidas de Dispersão podem ser divididas em três grupos:

- Medidas de distância entre certos valores representativos, tal como o limite.
- Medidas de desvio de cada membro da população em relação a algum valor central, tais como desvio médio em relação à média, desvio médio em relação à mediana e desvio padrão.
- Medidas de desvio entre todos os membros da população, tal como diferença média.

A seguir estas medidas são melhor explicadas.

- **Limite**

O limite de uma distribuição é dado pela diferença entre a maior e a menor variável valor dentre os membros. Como o limite é uma medida descritiva, ele é muito pouco usado e a determinação do mesmo não permite conhecer o comportamento da distribuição dentro deste intervalo.

- Desvios Médios e Desvio Padrão

A medida de espalhamento de uma população é realizada em termos dos desvios em torno da média. Pode-se assim escrever

$$\delta_1 = \int_{-\infty}^{\infty} |x - \mu| dP, \quad (\text{A.18})$$

em que são tomados os valores absolutos dos desvios, e  $\delta_1$  é definido como coeficiente de dispersão, podendo também ser denominado desvio médio em torno da média.

Analogamente para a mediana obtém-se

$$\delta_2 = \int_{-\infty}^{\infty} |x - \mu_e| dP, \quad (\text{A.19})$$

e  $\delta_2$  é o desvio médio em torno da mediana.

Foi visto que a média sobre um ponto arbitrário  $a$  é dado por

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} (x - a) dP. \quad (\text{A.20})$$

Pode-se então, de acordo com a terminologia da estatística, classificar esta equação como primeiro momento, e definir um segundo momento por

$$\mu^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - a)^2 dP. \quad (\text{A.21})$$

O segundo momento em torno da média é escrito como

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 dF, \quad (\text{A.22})$$

e denominado variância. A raiz quadrada positiva da variância é então definida como desvio padrão, denotado por  $\sigma$ , obtendo-se

$$\sigma = |\sqrt{\sigma^2}|. \quad (\text{A.23})$$

A variância é então a média dos quadrados dos desvios em relação à média aritmética. O cálculo da variância e do desvio padrão provém do método utilizado para o cálculo da média. Em particular, se  $b$  é algum valor arbitrário,

$$\begin{aligned}\mu^2(\text{em torno de } a) &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - a)^2 dP \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - b)^2 + 2(b - a)(x - b) + (b - a)^2 dP \\ &= \mu^2(\text{em torno de } b) + 2(b - a)\mu(\text{em torno de } b) + (b - a)^2.\end{aligned}\tag{A.24}$$

Se  $b$  é o valor médio tem-se

$$\mu^2 = \sigma^2 + (\mu - a)^2 \quad \text{ou} \quad \sigma^2 = \mu^2 - (\mu - a)^2.\tag{A.25}$$

Logo, para simplificar alguns cálculos, a variância pode ser facilmente calculada a partir do segundo momento em torno de um ponto arbitrário.

- Diferença Média

O coeficiente de diferença média (diferente de desvio médio) é definido por

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |x - y| dP(x) dP(y) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |x - y| p(x)p(y) dx dy.\end{aligned}\tag{A.26}$$

se  $dP(x)$  e  $dP(y)$  forem diferenciáveis.

No caso discreto, tem-se duas formas diferentes. A primeira dada por

$$\Delta_1 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |x_j - x_k| p(x_j)p(x_k), \quad j \neq k,\tag{A.27}$$

para a diferença média sem repetição, ou

$$\Delta_1 = \frac{1}{N^2} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |x_j - x_k| p(x_j)p(x_k),\tag{A.28}$$

para a diferença média com repetição. A diferença entre as duas ocorre apenas no denominador e não é significativo se  $N$  for grande.

A diferença média é a média das diferenças entre todos os possíveis pares de variáveis-valores, desconsiderando os sinais. No coeficiente com repetição, cada valor é comparado a ele mesmo, e apesar de não acrescentar nada na soma dos desvios, resulta em número total de pares  $N^2$ . No coeficiente sem repetição apenas a comparação entre valores diferentes é considerada, resultando em  $N(N-1)$  pares.

- Coeficientes de Variação

As medidas de dispersão precedentes são expressas em termos de unidades das variáveis, dificultando a comparação de dispersões entre diferentes populações a menos que as unidades sejam idênticas. Assim, surgiu a procura por medidas independentes da escala das variáveis, ou seja, medidas representadas por números puros.

Diversos coeficientes do tipo foram obtidos, porém apenas dois vêm sendo extensivamente usados, o coeficiente de variação de *Karl Pearson*, definido por

$$V = 100 \frac{\sigma}{\mu}, \quad (\text{A.29})$$

e o coeficiente de concentração de Gini, definido por

$$G = \frac{\Delta_1}{2\mu}. \quad (\text{A.30})$$

Estes coeficientes tem a desvantagem de serem muito afetados pelo valor da média  $\mu$  em torno de alguma origem arbitrária, não sendo empregados a menos que exista uma origem natural para as medições ou as comparações sejam realizadas entre distribuições com origem similares.

Com o objetivo de contornar o problema, seja  $\sigma$  e  $\mu$  o desvio padrão e a média de uma distribuição de frequência que será representada em termo de uma nova variável  $y$  relacionada com  $x$  por

$$y = \frac{x - \mu}{\sigma}. \quad (\text{A.31})$$

Qualquer distribuição expressa pela Equação A.31 terá média zero e variância um, sendo por isso denominada de medida padrão ou padronização. Logo, duas distribuições padronizadas deste modo podem ser comparadas.

## A.5 Valor Esperado ou Esperança

A concepção da média aritmética de uma variável pode ser estendida para a média de uma função desta variável, por exemplo,  $f(x)$ . Na verdade, define-se

$$E[f(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dP, \quad (\text{A.32})$$

como valor esperado ou esperança, podendo-se ter uma soma no segundo membro da Equação A.32 caso a variável seja discreta. A esperança tem um papel fundamental na teoria estatística e das probabilidades.

Generalizando o conceito para uma função  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  tem-se

$$E[f(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, \dots, x_n)dP(x_1, \dots, x_n), \quad (\text{A.33})$$

Para a distribuição multivariável, num caso particular de  $f$  ser função de  $x_1$  apenas, integrando com relação a  $x_2, \dots, x_n$ ,

$$E[f(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1)dP(x_1), \quad (\text{A.34})$$

em que  $P(x_1)$  representa a função distribuição marginal de  $x_1$ .

Dois propriedades importantes do valor esperado devem ser ressaltadas:

- O valor esperado da soma é a soma dos valores esperados. Sejam  $f_1$  e  $f_2$  duas funções, seguindo da definição tem-se

$$E[f_1(x_1) + f_2(x_2)] = E[f_1(x_1)] + E[f_2(x_2)]. \quad (\text{A.35})$$

- O valor esperado do produto de duas funções das variáveis é o produto das suas esperanças caso as variáveis sejam independentes. Por exemplo, sejam  $x_1$  e  $x_2$  variáveis independentes, assim

$$\begin{aligned}
E[f_1(x_1)f_2(x_2)] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x_1)f_2(x_2)dP(x_1, x_2) \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x_1)dP(x_1, \infty) \int_{-\infty}^{\infty} f_2(x_2)dP(\infty, x_2) \\
&= E[f_1(x_1)]E[f_2(x_2)].
\end{aligned} \tag{A.36}$$

A Equação A.36 não é válida se as variáveis forem dependentes.

## A.6 Coeficiente de Correlação

Há variáveis aleatórias  $(X, Y)$  dando origem a uma amostra aleatória do tipo  $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$ . Um dos parâmetros importantes, associados a estas variáveis aleatórias é o coeficiente de correlação. Tal coeficiente pode ser definido como

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \tag{A.37}$$

em que  $\bar{X}$  e  $\bar{Y}$  são as médias das variáveis  $X$  e  $Y$  respectivamente.

A fim de calcular  $r$ , é mais simples empregar um desdobramento da Equação A.37 dado por:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2}}. \tag{A.38}$$

## A.7 Intervalos de Confiança

Uma maneira de se ter uma estimativa de uma distribuição é mediante um intervalo de confiança, que conduz frequentemente a resultados muito significativos. Suponha que  $X$  possua uma distribuição normal com  $N(\mu, \sigma^2)$ , onde se supõe  $\sigma^2$  um parâmetro conhecido e  $\mu$  um parâmetro desconhecido. Seja  $X_1, \dots, X_n$  uma amostra aleatória de  $X$  e seja  $\bar{X}$  a média amostral.

Tendo  $\bar{X}$  uma distribuição  $N(\mu, \sigma^2/n)$ , portanto,  $Z = [(\bar{X} - \mu)/\sigma]\sqrt{n}$  terá distribuição  $N(0, 1)$ . Muito embora  $Z$  dependa de  $\mu$ , sua distribuição de probabilidade não depende. Considere então

$$\begin{aligned} 2\Phi(z) - 1 &= P(-z \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma}\sqrt{n} \leq z) \\ &= P(-\frac{z\sigma}{\sqrt{n}} - \bar{X} \leq -\mu \leq +\frac{z\sigma}{\sqrt{n}} - \bar{X}) \\ &= P(\bar{X} - \frac{z\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + \frac{z\sigma}{\sqrt{n}}). \end{aligned} \quad (\text{A.39})$$

A expressão acima deve ser interpretada assim:  $2\Phi(z) - 1$  é igual à probabilidade de que o intervalo aleatório  $(\bar{X} - z\sigma/\sqrt{n}, \bar{X} + z\sigma/\sqrt{n})$  contenha  $\mu$ , sendo tal intervalo denominado **intervalo de confiança** do parâmetro  $\mu$ . Sendo  $z$  arbitrário, pode-se escolhê-lo de modo que a probabilidade acima seja igual, por exemplo, a  $1 - \alpha$ . Conseqentemente,  $z$  ficará definido pela relação  $\Phi(z) = 1 - (\alpha/2)$ . Este valor  $z$ , denotado por  $K_{1-(\alpha/2)}$ , pode ser obtido das tábuas da distribuição normal. Isto é, ter-se-á  $\Phi(K_{1-(\alpha/2)}) = 1 - (\alpha/2)$  (Veja também a Figura A.1).

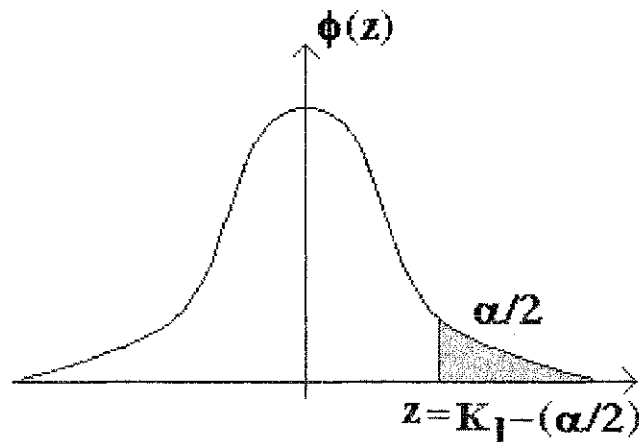


Figura A.1: Gráfico para entendimento da definição de intervalo de confiança.

Em resumo, o intervalo  $(\bar{X} - n^{-1/2}\sigma K_{1-\alpha/2}, \bar{X} + n^{-1/2}\sigma K_{1-\alpha/2})$  é um intervalo de confiança do parâmetro  $\mu$ , com coeficiente de confiança  $(1 - \alpha)$ , ou um intervalo de

confiança  $100(1 - \alpha)\%$ .

Sendo a variância  $\sigma^2$  conhecida, um intervalo de confiança de 95% para  $\mu$ , significa que 95% vezes,  $\mu$  estará contido no intervalo.

O comprimento  $L$  para o presente intervalo de confiança, pode ser escrito como

$$L = (\bar{X} + n^{-1/2}\sigma K_{1-(\alpha/2)}) - (\bar{X} - n^{-1/2}\sigma K_{1-(\alpha/2)}) = 2\sigma n^{-1/2}K_{1-(\alpha/2)}. \quad (\text{A.40})$$

Deve-se observar que  $L$  será uma função decrescente de  $n$ , ou seja, para se ter um  $L$  menor, maior deve ser o valor de  $n$ . Mais precisamente, deve-se quadruplicar  $n$  a fim de reduzir  $L$  à metade.

## A.8 Distribuição de $t$ de Student

Na análise realizada anteriormente a variância  $\sigma^2$  era conhecida, porém um outro procedimento pode ser empregado caso não se tenha o conhecimento desta grandeza. Suponha que a estimação de  $\sigma^2$  seja feita por meio de uma estimativa não-tendenciosa

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (\text{A.41})$$

em que  $\hat{\sigma}^2$  é a estimativa da variância.

Considere também a variável aleatória dada pela Equação A.42

$$t = \frac{(\bar{X} - \mu)\sqrt{n}}{\hat{\sigma}}. \quad (\text{A.42})$$

A distribuição de probabilidade da variável aleatória  $t$  é muito mais complicada do que a de  $Z = (\bar{X} - \mu)\sqrt{n}/\sigma$ , pois na definição de  $t$ , ambos, numerador e denominador, são variáveis aleatórias enquanto  $Z$  é apenas uma função linear de  $X_1, \dots, X_n$ . Para obter a distribuição de  $t$ , levar-se-á em conta os seguintes fatos:

1.  $Z = (\bar{X} - \mu)\sqrt{n}/\sigma$  tem distribuição  $N(0, 1)$ .
2.  $V = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2/\sigma^2$  tem uma distribuição de qui-quadrado, com  $(n-1)$  graus de liberdade.



3.  $Z$  e  $V$  são variáveis aleatórias independentes.

Com o auxílio do teorema a seguir, pode-se obter a fdp de  $t$ . Suponha que as variáveis aleatórias  $Z$  e  $V$  sejam independentes e tenham, respectivamente, as distribuições  $N(0, 1)$  e  $\chi_k^2$ . Defina-se

$$t = \frac{Z}{\sqrt{V/k}}. \quad (\text{A.43})$$

Então, a fdp de  $t$  será dada por

$$p_k(t) = \frac{\Gamma[(k+1)/2]}{\Gamma(k/2)\sqrt{\pi k}} \left(1 + \frac{t^2}{k}\right)^{-(k+1)/2}, \quad -\infty < t < \infty. \quad (\text{A.44})$$

Esta distribuição é conhecida como **distribuição de  $t$  de Student** com  $k$  graus de liberdade.

O teorema anterior pode ser aplicado diretamente para obter-se a fdp de  $t = (\bar{X} - \mu)\sqrt{n}/\hat{\sigma}$ . Esta variável aleatória tem distribuição de  $t$  de Student, com  $(n-1)$  graus de liberdade. Note-se que, muito embora o valor de  $t$  dependa de  $\mu$ , sua distribuição não depende. O gráfico de  $p_k$  é simétrico, como apresentado na Figura A.2. De fato, ele se assemelha ao gráfico da distribuição normal, podendo-se verificar que

$$\lim_{k \rightarrow \infty} p_k(t) = (1/\sqrt{2\pi}) \exp^{-t^2/2}. \quad (\text{A.45})$$

O problema de como obter um intervalo de confiança para a média de uma variável aleatória normalmente distribuída, com a variância desconhecida, pode ser solucionado de maneira inteiramente análoga àquela empregada anteriormente. Para a média  $\mu$  e com um coeficiente de confiança  $(1 - \alpha)$ , obtêm-se o seguinte intervalo de confiança

$$(\bar{X} - n^{-1/2}\hat{\sigma}t_{n-1,1-\alpha/2}, \bar{X} + n^{-1/2}\hat{\sigma}t_{n-1,1-\alpha/2}). \quad (\text{A.46})$$

Desse modo, o coeficiente de confiança acima apresentado tem a mesma estrutura daquele anteriormente citado, diferindo pela substituição do valor conhecido de  $\sigma$  por sua estimativa  $\hat{\sigma}$  e da constante  $K_{1-\alpha/2}$ , que anteriormente era obtida das tábuas da distribuição normal, substituída por  $t_{n-1,1-\alpha/2}$ , esta obtida das tábuas da distribuição  $t$ .

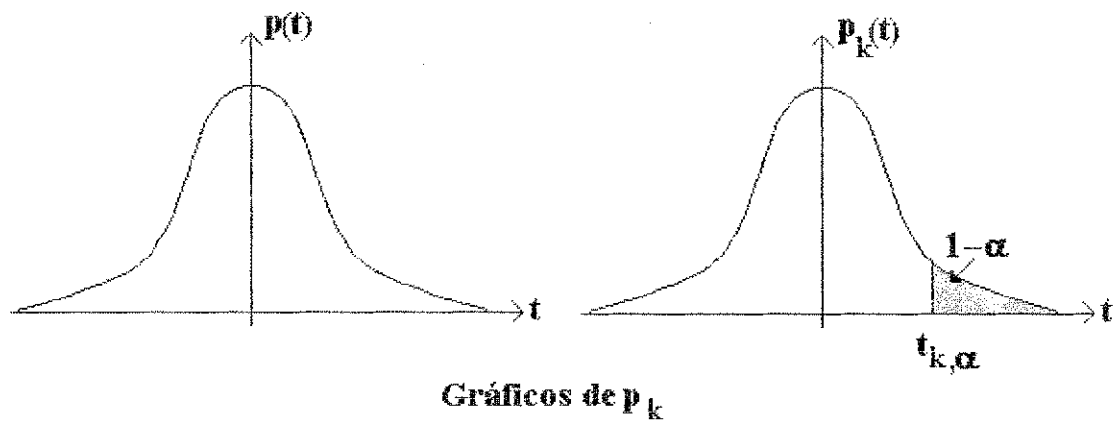


Figura A.2: Gráfico de  $p_k(t)$ .

O comprimento  $L$ , do respectivo intervalo de confiança é dado por

$$L = 2n^{-1/2}\hat{\sigma}t_{n-1,1-\alpha/2}. \quad (\text{A.47})$$

Neste caso  $L$  não é uma constante, pois depende de  $\hat{\sigma}$ , a qual depende dos valores amostrais  $(X_1, \dots, X_n)$ .

# Apêndice B

## Teoria Básica de Antenas

Em 1886, no Laboratório Karlsruhe de Heinrich Hertz, o rádio foi criado e as primeiras antenas foram inventadas. Desde esse tempo uma enorme variedade de tipos de antenas foi desenvolvida. Nesta seção serão apresentados os conceitos e as fórmulas básicas da Teoria de Antenas. Tal estudo visa chegar à fórmula de transmissão em espaço-livre de Friis como também a representação em diagramas de irradiação. Uma análise mais rigorosa pode ser obtida em [69].

### B.1 Conceitos Básicos

Apesar dos vários tipos de antenas, todas elas envolvem o mesmo princípio básico no qual a irradiação é produzida pela aceleração ou desaceleração da carga. A **equação básica de irradiação** pode ser expressa como

$$\frac{dI}{dt}L = Q \frac{dv}{dt} \quad (\text{B.1})$$

sendo  $\frac{dI}{dt}$  a derivada da corrente com relação ao tempo ( $As^{-1}$ ),  $L$  o comprimento do elemento de corrente (m),  $Q$  a carga (C),  $\frac{dv}{dt}$  a derivada da velocidade com relação ao tempo, isto é, a aceleração da carga ( $ms^{-2}$ ). A irradiação é perpendicular à aceleração e a potência irradiada é proporcional ao quadrado de  $(L\frac{dI}{dt})$  ou  $(Q\frac{dv}{dt})$ .

Pode-se definir **antena** como um equipamento transmissor, ou transdutor, entre uma onda guiada e uma onda no espaço livre. Em outras palavras, antena é um

equipamento cujas interfaces são um circuito e o espaço livre. Ela converte fótons de energia em energia elétrica e vice-versa. Na Figura B.1 observa-se uma região intermediária na qual a onda guiada pela linha de transmissão é irradiada no espaço-livre. Esta região da linha age como uma antena.

Considerando uma antena contida dentro de um volume de raio  $b$ , como mostrada na Figura B.2, e restringindo-se apenas ao campo distante da antena, pode-se fazer observações dos campos ao longo de um círculo de grande raio  $R$ . A esta distância, qualquer antena, independente de seu tamanho e complexidade, pode ser representada por uma única fonte pontual, os campos mensuráveis são inteiramente transversos e o fluxo de potência, ou vetor de Poynting, é inteiramente radial.

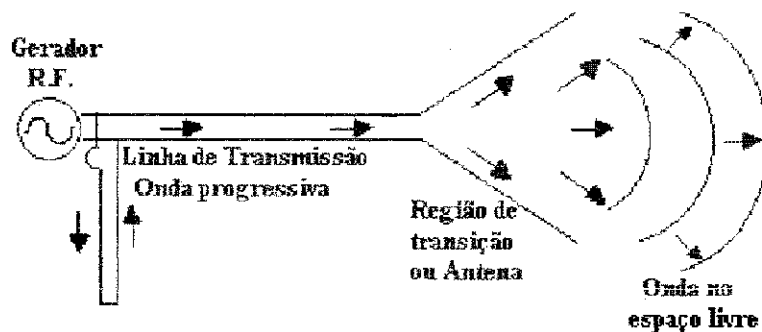


Figura B.1: Exemplo de antena.

Uma grandeza importante a ser ressaltada é a temperatura da antena  $T_A$ . Ela é uma grandeza escalar relacionada com a temperatura das regiões distantes do espaço associada ao padrão de irradiação da antena, não estando relacionada à temperatura física própria da antena.

O **padrão de irradiação** de uma antena é a distribuição geográfica do campo ou potência irradiada pela fonte. Ele é uma grandeza tridimensional comumente dada em função das coordenadas esféricas  $\theta$  e  $\phi$ .

O padrão de irradiação de uma antena também pode ser dado em termos dos planos de azimute (horizontal) e de elevação (vertical), seccionando o eixo do lóbulo principal, no qual se dá a máxima radiação da antena. Uma **fonte isotrópica** é aquela

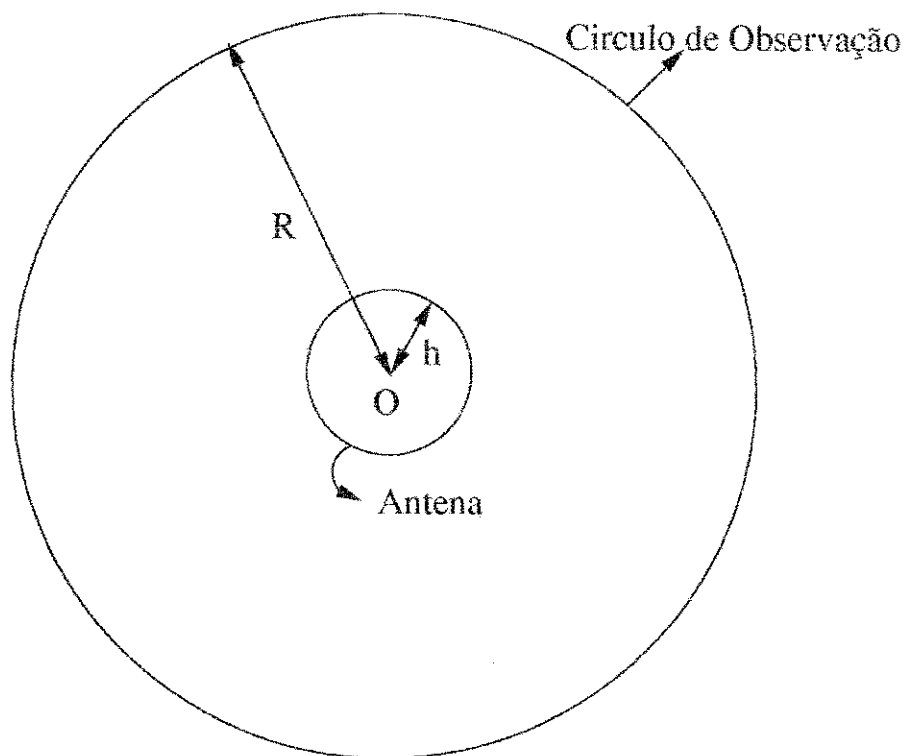


Figura B.2: Antena e círculo de observação.

que irradia energia em todas as direções, sendo o seu padrão de irradiação um círculo em ambos os planos. Antenas com padrão de irradiação azimutal aproximadamente circular são chamadas de omnidirecionais enquanto antenas com padrões direcionais são denominadas antenas diretivas.

Mediante as características do padrão de irradiação por meio de uma representação completa em três dimensões, obtém-se valores únicos de grandezas escalares importantes para diversas aplicações em engenharia. Dentre estas grandezas, tem-se a Diretividade da Antena  $D$ , o Ganho da Antena  $G$  e a Abertura da Antena. Mais detalhes a respeito do padrão de irradiação serão mostrados na seção de mesmo título, que se segue.

Uma antena transmissora no espaço livre, representada por uma fonte pontual, irradia energia em linhas radiais. A relação do fluxo de potência eletromagnética (energia) por unidade de área é o vetor de Poynting ou densidade de potência ( $\text{watts/m}^2$ ). Desta forma, o vetor de Poynting para uma fonte pontual possui somente a componente radial  $P_r$  sem componentes nas direções  $\theta$  e  $\phi$ . Para uma fonte isotrópica a componente radial do vetor de Poynting é independente de  $\theta$  e  $\phi$ .

A potência irradiada através de uma superfície  $S$  é definida como

$$W(\theta, \phi) = \int \int \mathbf{P}(\theta, \phi) \cdot d\mathbf{s} = \int \int P_r(\theta, \phi) ds, \quad (\text{B.2})$$

sendo  $P_r(\theta, \phi)$  a componente radial de  $\mathbf{P}(\theta, \phi)$ ,  $(\theta, \phi)$  são os ângulos de azimute e elevação a partir do centro geométrico da antena e  $ds$  uma área infinitesimal em  $S$ . Uma fonte isotrópica irradia uniformemente através de uma superfície esférica. Conseqüentemente,  $W = P_r \int \int ds = P_r \cdot 4\pi r^2$ , sendo  $r$  o raio da esfera.

A fórmula de transmissão no espaço-livre é obtida a partir da definição precedente. Para uma fonte pontual num meio sem perdas, a densidade de potência recebida a uma distância radial  $r$  a partir da fonte é

$$P_r(\theta, \phi) = \frac{W(\theta, \phi)}{4\pi r^2}. \quad (\text{B.3})$$

A **intensidade de irradiação** ( $U(\theta, \phi)$ ) é a potência por unidade de ângulo sólido. Uma área  $S$  da superfície de uma esfera vista do centro da mesma, subtendendo um

**ângulo sólido**  $\Omega$ . O ângulo sólido total subtendido por uma esfera é  $4\pi$  esferoradianos. Assim, a uma distância radial  $r$ ,

$$U(\theta, \phi) = r^2 P_r(\theta, \phi), \quad (\text{B.4})$$

A intensidade de irradiação é dada em watts por radianos ao quadrado (esferoradianos), ( $W \cdot sr^{-1}$ ). Para uma fonte isotrópica  $U_0(\theta, \phi) = r^2 P(\theta, \phi) = W(\theta, \phi)/4\pi$ .

Dividindo-se  $U(\theta, \phi)$  por seu valor máximo obtém-se a intensidade de irradiação normalizada, cujo maior valor que pode apresentar é a unidade. Desta forma,

$$U_n(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_M(\theta, \phi)} = \frac{P(\theta, \phi)}{P(\theta, \phi)_{max}}. \quad (\text{B.5})$$

A **diretividade** ( $D$ ) é a razão entre a intensidade de irradiação máxima ( $U_M(\theta, \phi)$ ) da antena em consideração e a intensidade de irradiação de uma antena isotrópica ( $U_0(\theta, \phi)$ ) irradiando a mesma potência.

$$D = \frac{U_M(\theta, \phi)}{U_0(\theta, \phi)}. \quad (\text{B.6})$$

A diretividade é uma razão adimensional maior ou igual a um, de suma importância para a análise do desempenho da antena. Uma antena isotrópica possui diretividade 1 enquanto uma antena com um padrão de irradiação hemisférico apresenta diretividade 2.

A diretividade também pode ser expressa como

$$D = \frac{\text{Intensidade de irradiação máxima}}{\text{Intensidade de irradiação média}} = \frac{U_M(\theta, \phi)}{U(\theta, \phi)_{med}}. \quad (\text{B.7})$$

A intensidade de irradiação média é a potência total sobre o ângulo sólido total  $4\pi$ . Logo,

$$D = \frac{U_M(\theta, \phi)}{\frac{\iint U(\theta, \phi) d\Omega}{4\pi}} = \frac{4\pi}{\frac{\iint U(\theta, \phi) d\Omega}{U_M(\theta, \phi)}} = \frac{4\pi}{B} \quad (\text{B.8})$$

sendo

$$B \triangleq \frac{\iint U_n(\theta, \phi) d\Omega}{U_M(\theta, \phi)} \quad (\text{B.9})$$

definido como a área do feixe. Tratando rigorosamente,  $B$  é adimensional, todavia corresponde ao ângulo sólido da região considerada. Conseqüentemente, ele pode ser expresso sem qualquer unidade ou em radianos ao quadrado (esferoradianos).

O **ganho** ( $G$ ) fornece a medida de eficiência da antena. Ele é expresso em relação a uma fonte de referência e pode ser dado por

$$G \triangleq \frac{\text{Intensidade de irradiação máxima}}{\text{Intensidade de irradiação de uma referência com igual potência de entrada}} \quad (\text{B.10})$$

Usualmente, toma-se como referência uma fonte isotrópica de eficiência 100%. Assim,

$$G \triangleq \frac{\text{Intensidade de irradiação máxima}}{\text{Intensidade de irradiação de uma fonte isotrópica}} \quad (\text{B.11})$$

Considere  $U'_M(\theta, \phi)$  a intensidade de irradiação máxima de uma antena real (com perdas) e  $U_M(\theta, \phi)$  a intensidade para uma antena ideal (sem perdas) com 100% de eficiência. Então  $U'_M(\theta, \phi) = \eta U_M(\theta, \phi)$ , sendo  $0 \leq \eta \leq 1$  a eficiência. Desse modo, usando as Equações B.6 e B.10, pode-se obter,

$$G = \frac{U'_M(\theta, \phi)}{U_0(\theta, \phi)} = \eta \frac{U_M(\theta, \phi)}{U_0(\theta, \phi)} = \eta D. \quad (\text{B.12})$$

Para uma antena isotrópica sem perdas  $G = D = 1$ . Porém, caso a antena não seja 100% eficiente, o ganho será menor que a diretividade. Em geral, o ganho e a diretividade são dados em decibéis (dB), isto é,  $10 \log G$  e  $10 \log D$ , respectivamente.

Pode-se ainda obter a função ganho e a diretividade em uma direção para a qual a intensidade de radiação não é máxima, bastando, para tanto, especificar os ângulos  $\theta$  e  $\phi$  da direção na qual tais grandezas desejam ser calculadas.

Logo, o ganho  $G$  de uma antena transmissora é o máximo valor de sua função ganho

$$G \triangleq \max_{\theta, \phi} g(\theta, \phi). \quad (\text{B.13})$$

Até então, neste capítulo, fez-se apenas considerações com relação à potência. Contudo, a fim de descrever o campo distante de uma antena representada por uma fonte



pontual, pode-se considerar a intensidade de campo elétrico ou o vetor campo elétrico  $\vec{E}$ . O vetor campo elétrico de uma fonte pontual apresenta somente as componentes  $E_\theta$  e  $E_\phi$  sendo totalmente transverso, enquanto o vetor de *Poynting* em torno da mesma apresenta apenas componente radial. Conforme foi citado, tais condições caracterizam o campo distante de uma antena. Isto é ilustrado na Figura B.3.

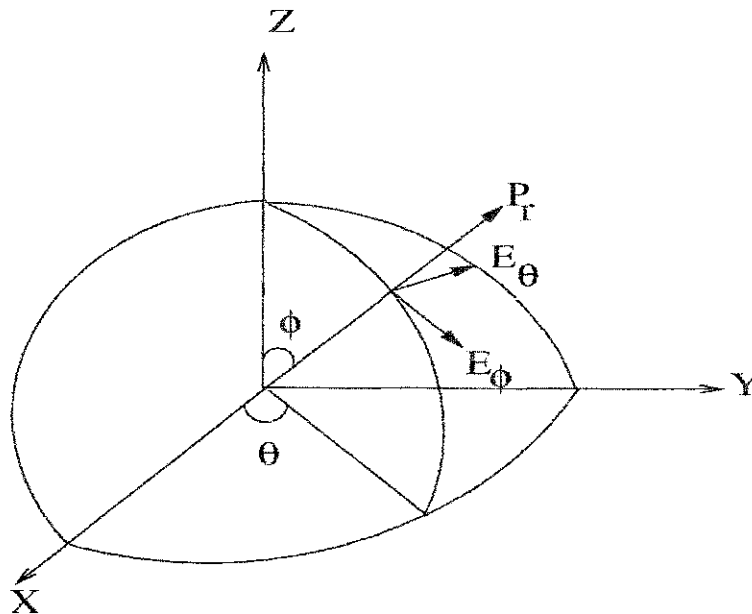


Figura B.3: Ilustração da posição das componentes do campo elétrico em torno da antena.

A intensidade do campo elétrico total ( $E$ ) é dada por

$$E = \sqrt{E_\theta^2 + E_\phi^2}. \quad (\text{B.14})$$

A abertura da antena (dada em metros quadrados) é definida como a razão entre as perdas de potência (em watts) e à densidade de potência (dada em watts por metro quadrado) da onda. Então,

$$A = \frac{W_{\text{perdas}}}{P}.$$

Sendo  $A$  a abertura da antena dada em  $m^2$ . A abertura pode ser interpretada como a área virtual da antena imersa em um campo eletromagnético. Dependendo das perdas a serem consideradas, pode-se ter diferentes tipos de abertura de antenas:

- Abertura efetiva – a razão entre a potência enviada à impedância terminal e a densidade de potência. A abertura máxima efetiva é conhecida como *área efetiva*.
- Abertura de perda – a razão entre a potência dissipada com o calor e a densidade de potência.
- Abertura de espalhamento – a razão entre a potência refletida para trás pela antena e a densidade de potência.
- Abertura de absorção – a soma das aberturas efetiva, de perda e espalhamento.
- Abertura física – o tamanho físico da antena.

Ganho, diretividade e abertura estão intrinsecamente relacionados. A relação entre ganho e diretividade é expressa pela Equação B.12. O parâmetro comum entre diretividade e abertura é a potência. Numa antena receptora, a potência extraída do campo eletromagnético aumenta com o aumento da diretividade e da área efetiva. Desta forma,

$$D = KA, \quad (\text{B.15})$$

sendo  $K$  uma constante e  $A$  a área efetiva da antena. Então, para duas antenas apresentando diretividades  $D_i$  e  $D_j$  a áreas efetivas  $A_i$  e  $A_j$ ,

$$\frac{D_i}{D_j} = \frac{A_i}{A_j}. \quad (\text{B.16})$$

Usando as Equações B.12 e B.16, tem-se

$$\frac{\eta_j G_i}{\eta_i G_j} = \frac{D_i}{D_j} = \frac{A_i}{A_j}, \quad (\text{B.17})$$

sendo  $\eta_i$ ,  $\eta_j$  e  $G_i$ ,  $G_j$  as eficiências e os ganhos das antenas  $i$  e  $j$ , respectivamente.

Estes parâmetros foram determinados para alguns tipos antenas de interesse:

- Antena isotrópica:  $A = \lambda^2/4\pi = 0.796\lambda^2$ ,  $D = 1$
- Dipolo curto:  $A = 3\lambda^2/8\pi$ ,  $D = 3/2$

- Dipolo (linear com meio comprimento de onda):  $A = 30/73\pi$ ,  $D = 1,64$

Nestes exemplos  $\lambda$  representa o comprimento de onda. Usando a Equação B.16 e qualquer par  $A$  e  $D$  de uma dessas antenas, mostra-se que para qualquer antena  $i$ ,

$$A_i = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_i. \quad (\text{B.18})$$

Todas as antenas sem perdas possuem uma área efetiva igual ou menor que  $0.796\lambda^2$ .

A fórmula de Friis para transmissão em espaço-livre é obtida como se segue: Sendo  $W_t$  a potência de entrada de uma antena transmissora tendo ganho  $G_t$ . A potência irradiada é  $G_t W_t$  e a densidade de potência a uma distância  $r$  é

$$P = \frac{G_t W_t}{4\pi r^2} \quad (\text{B.19})$$

A potência total recebida pela carga a uma distância  $r$  é

$$W_r = A_r P = \frac{A_r G_t W_t}{4\pi r^2}, \quad (\text{B.20})$$

sendo  $A_r$  a abertura da antena. Combinando-se as Equações B.18 e B.20 obtém-se

$$\frac{W_r}{W_t} = G_t D_r \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2. \quad (\text{B.21})$$

se o ganho for igual à diretividade ( $\eta = 1$ ) no receptor, então

$$\frac{W_r}{W_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2. \quad (\text{B.22})$$

A Equação B.22 é conhecida com Fórmula de Friis para transmissão em espaço-livre.

Considere que a potência transmitida  $W_t$  é irradiada por uma fonte isotrópica, isto é,  $G_t = D_t$ . Pode-se re-escrever a Equação B.22 como

$$\frac{W_r}{W_t} = D_t D_r \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2. \quad (\text{B.23})$$

Substituindo B.18 na Equação B.23 acima tem-se

$$\frac{W_r}{W_t} = \frac{A_r A_t}{r^2 \lambda^2}, \quad (\text{B.24})$$

sendo  $A_r$  e  $A_t$  as aberturas efetivas das antenas no receptor e transmissor respectivamente.

## B.2 Padrões de Irradiação

Qualquer antena transmissora é composta por uma montagem alimentadora que ilumina uma abertura ou uma superfície refletora, a partir do qual o campo é irradiado. Este campo, a partir de certa distância, é transmitido pela antena como uma onda plana com polarização e distribuição espacial da densidade de potência do campo. A distribuição espacial de potência de uma antena transmissora é descrita pelo padrão de irradiação, que, como foi visto anteriormente, pode ser definido como

$$W(\theta, \phi) = \text{potência transmitida por unidade de ângulo sólido na direção } (\theta, \phi) \quad (\text{B.25})$$

sendo  $(\theta, \phi)$  os ângulos de azimute e elevação a partir do centro geométrico da antena, como mostrado na Figura B.4.

Desta forma, o padrão de irradiação da antena indica a quantidade de potência do campo que atravessa uma unidade de ângulo sólido numa dada direção a partir do centro da antena.

Em adição ao seu conteúdo de potência, um campo eletromagnético também tem uma determinada *polarização* (orientação no espaço). Esta polarização é determinada pela maneira na qual o campo eletromagnético é excitado na antena antes da propagação. As polarizações mais comuns em enlaces de comunicações são a linear e a circular. Na polarização linear o campo eletromagnético é alinhado segundo uma onda plana durante toda a propagação. Estas direções são normalmente denominadas como polarização vertical e polarização horizontal (relativa às coordenadas da antena).

O padrão de irradiação de uma antena é freqüentemente normalizado para formar a função ganho da antena. Em geral, uma antena é projetada para transmitir em uma direção específica, chamada de *lóbulo principal* da antena. Transmissões em outras direções são chamadas de *lóbulos laterais* da antena e representam a potência transmitida em direções indesejáveis. Embora seja função de dois ângulos, os padrões de irradiação são geralmente apresentados em termos de um ângulo planar, como apresentado na Figura B.5, que mostra o ganho observado em direções angulares a partir da origem da antena, identificando claramente o lóbulo principal e os lóbulos laterais.

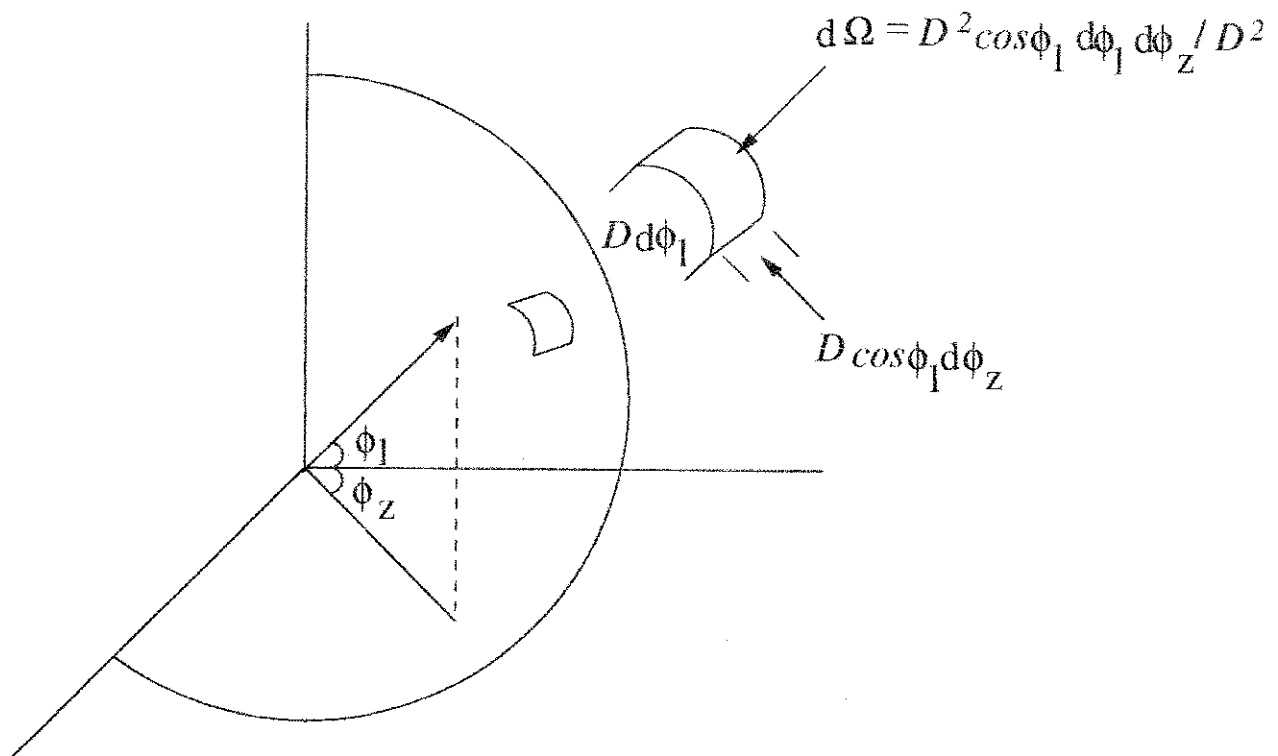


Figura B.4: Geometria da antena.

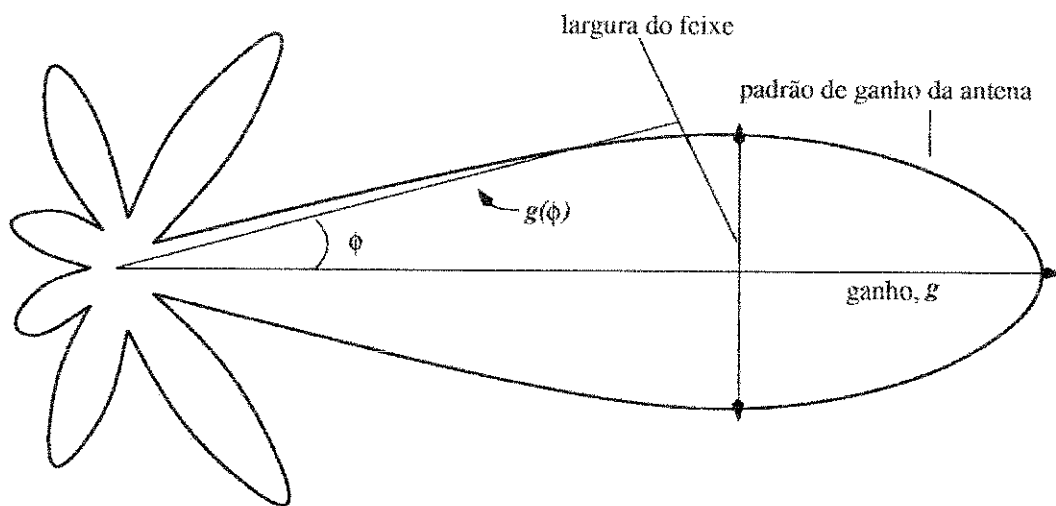


Figura B.5: Função ganho  $g(\phi)$  planar de uma antena.

## Apêndice C

# Normas Estabelecidas para a Utilização e Vivisseccção de Animais em Pesquisas

Lei 6.638, 08 de maio de 1979.

### ESTABELECE NORMAS PARA A PRÁTICA DIDÁTICA - CIÊNÉTICA DA VIVISSECCÇÃO DE ANIMAIS E DETERMINA OUTRAS PROVIDÊNCIAS.

**Art. 1º** - Fica permitida, em todo território nacional, a vivisseccção de animais, nos termos desta lei.

**Art. 2º** - Os biotérios e centros de experiências e demonstrações com animais vivos deverão ser registrados em órgão competente e por ele autorizados a funcionar.

**Art. 3º** - A vivisseccção não será permitida:

I - Sem o emprego de anestesia;

II - Em centros de pesquisas e estudos não registrados em órgão competente;

III - Sem a supervisão de técnico especializado;

IV - Com animais que não tenham permanecido mais de quinze dias em biotério legalmente autorizados;

V - Em estabelecimentos de ensino de primeiros e segundo graus e em quaisquer locais freqüentados por menores de idade.

**Art. 4º** - O animal só poderá ser submetido às intervenções recomendadas nos protocolos das experiências que constituem a pesquisa ou programas de aprendizado cirúrgico quando, durante ou após a vivisseccção, receber cuidados especiais.

1º - Quando houver indicação, o animal poderá ser sacrificado sob estrita obediência às prescrições científicas.

2º - Caso não sejam sacrificados, os animais utilizados em experiência ou demonstrações somente poderão sair do biotério trinta dias após a intervenção, desde que destinados a pessoas ou entidades idôneas que por eles queiram responsabilizar-se.

**Art.5º** - Os infratores desta lei estão sujeitos:

I - Às penalidades cominadas do artigo 64, caput, do Decreto Lei no 3.688 de 3-10-1941, no caso de ser a primeira infração;

II - À interdição e cancelamento de registro do biotério ou centro de pesquisa, no caso de reincidência.

**Art. 6º** - O poder Executivo, no prazo de noventa dias, regulamentará a presente Lei, especificando;

I - O órgão competente para o registro e a expedição de autorização dos biotérios e centros de experiências e demonstrações com animais vivos;

II - As condições gerais exigíveis para o registro e o funcionamento dos biotérios;

III - Órgãos e autoridades competentes para a fiscalização dos biotérios e centros mencionados no inciso I.

**Art. 7º** - Esta Lei entrará em vigor na data de sua publicação.

**Art. 8º** - Revogam-se as disposições em contrário.

**Assinado por: João B. Figueiredo, Petrônio Portella, E. Portella e Ernani  
Guilherme Fernandes da Motta.**

## Apêndice D

# Normas Estabelecidas pelo Padrão IEEE C95.1-1991

O Padrão IEEE C95.1-1991 é o padrão do IEEE para níveis seguros relacionados a exposição humana a campos eletromagnéticos de radiofrequência na faixa de frequência de 3kHz a 300GHz em ambientes controlados (relacionado à exposição em locais onde as pessoas estão cientes da exposição e dos seus riscos) e ambientes não controlados (onde os indivíduos não tem conhecimento ou controle sobre a exposição).

Este padrão engloba a taxa de absorção específica (SAR) em tecidos biológicos e a corrente induzida e de contato associada com à exposição a campos eletromagnéticos como parâmetros a serem medidos, sendo suas normas especialmente usadas em pesquisas sobre efeitos biológicos, na fabricação e desenvolvimento de instrumentos, para sistemas e padrões de calibração e por indivíduos que trabalham na avaliação e inspeção de riscos graves.

As tabelas a seguir apresentam o nível máximo de exposição permitido para ambientes controlados e não controlados estabelecidos pelo padrão IEEE C95.1-1991.

Para frequências entre 100 kHz e 6 GHz, o limite máximo de exposição permitido para intensidades de campos eletromagnéticos pode ser excedido se:

- as condições de exposição, para ambientes controlados, produzem SARs médias abaixo de 0.4 W/kg para a SAR de corpo inteiro e pico espacial da SAR, não



Faixa de frequência (MHz)	Intensidade de Campo Elétrico (E) (V/m)	Intensidade de Campo Magnético (H) (A/m)	Densidade de Potência (S) (E,H) ou (mW/cm <sup>2</sup> )	Tempo Médio	
				$ E ^2,  H ^2$ ou S	
0.003-0.1	614	163	(100, 1 000000)	6	6
0.1-3.0	614	16.3/f	(100, 10 000/f <sup>2</sup> )	6	6
3.0-30	1842/f	16.3/f	(900/f <sup>2</sup> , 10 000/f <sup>2</sup> )	6	6
30-100	61.4	16.3/f	(1.0, 10 000/f <sup>2</sup> )	6	6
100-300	61.4	0.163	1.0	6	6
300-3000			f/300	6	6
3000-15 000			10	6	6
15 000-300 000			10	616 000/f <sup>1.2</sup>	

Tabela D.1: Máximo nível de exposição permitido para ambientes controlados.

Faixa de frequência (MHz)	Corrente Máxima (mA)		Contato
	Através de ambas as extremidades	Através de cada extremidade	
0.003-0.1	2000f	1000f	1000f
0.1-100	200	100	100

Tabela D.2: Limites para correntes de radiofrequência induzida e de contato em ambientes controlados.

Faixa de frequência (MHz)	Intensidade de Campo Elétrico (E) (V/m)	Intensidade de Campo Magnético (H) (A/m)	Densidade de Potência (S) (E,H) ou (mW/cm <sup>2</sup> )	Tempo Médio	
				$ E ^2, S$ ou $ H ^2$	
0.003-0.1	614	163	(100, 1 000000)	6	6
0.1-1.34	614	16.3/f	(100, 10 000/f <sup>2</sup> )	6	6
1.34-3.0	823.8/f	16.3/f	(180/f <sup>2</sup> , 10 000/f <sup>2</sup> )	f <sup>2</sup> /0.3	6
3.0-30	823.8/f	16.3/f	(180/f <sup>2</sup> , 10 000/f <sup>2</sup> )	30	6
30-100	27.5	158.3/f <sup>1.337</sup>	(0.2, 940 000/f <sup>3.337</sup> )	30	0.0636f <sup>1.337</sup>
100-300	27.5	0.0729	0.2	30	30
300-3000			f/1500	30	30
3000-15 000			f/1500	90 000/f	
15 000-300 000			10	616 000/f <sup>1.2</sup>	

Tabela D.3: Máximo nível de exposição permitido para ambientes não-controlados.

Faixa de frequência (MHz)	Corrente Máxima (mA)		Contato
	Através de ambas as extremidades	Através de cada extremidade	
0.003-0.1	900f	450f	450f
0.1-100	90	45	45

Tabela D.4: Limites para correntes de radiofrequência induzida e de contato em ambientes não-controlados.

ultrapassando uma média de 8 W/kg sobre qualquer 1g de tecido; exceto para as mãos, pulsos, pés e tornozelos nos quais o pico espacial da SAR não deve superar 20 W/kg, como média sobre quaisquer 10 g de tecido.

- as condições de exposição, para ambientes não-controlados, produzem SARs médias abaixo de 0.08 W/kg para a SAR de corpo inteiro e pico espacial da SAR, não ultrapassando uma média de 1.6 W/kg sobre qualquer 1g de tecido; exceto para as mãos, pulsos, pés e tornozelos nos quais o pico espacial da SAR não deve superar 4 W/kg, como média sobre quaisquer 10 g de tecido.

Os limites expostos nas tabelas acima também podem ser observados segundo os gráficos apresentados nas Figuras D.1 e D.2.

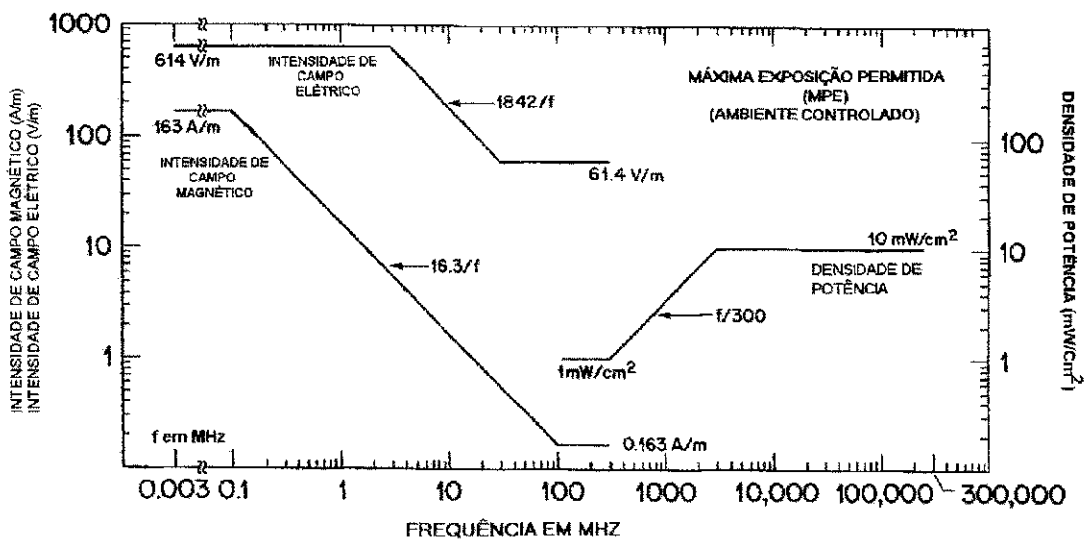


Figura D.1: Representação gráfica da máxima exposição permitida em função dos campos E e H e da densidade de potência S para ambientes controlados.