

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO/ ENGENHARIA BIOMÉDICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA GÔNDULA PARA REALIZAÇÃO DE  
EXPERIMENTOS EM UMA CENTRÍFUGA**

**MESTRANDA: Michele dos Santos Gomes**

**ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup>. Thaís Russomano , PhD**

**Área de Cconcentração: DSP & Engenharia Biomédica**

**Linha de Pesquisa: Engenharia Biomédica Aeroespacial**

MICHELE DOS SANTOS GOMES

**DESENVOLVIMENTO DE UMA GÔNDULA PARA REALIZAÇÃO DE  
EXPERIMENTOS EM UMA CENTRÍFUGA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Orientadora: Prof. Dra. Thais Russomano

Porto Alegre, dezembro 2007

## DEDICATÓRIA

*Ao contemplar a criação somos constantemente estimulados a descobrir, aprender, ensinar e recriar. O amor, na sua forma mais pura e elevada é o promotor de todas as formas de conhecimento. Dedico esse trabalho de pesquisa a quem é a "Suprema Ciência da Sabedoria, que a mente humana pode descobrir em cada um dos processos do universo estampados na natureza."; Deus. Pecotche, 1978.*

## AGRADECIMENTOS

Ser grato é um grande atributo da alma humana. A gratidão é um sentimento que quando cultivado credencia os seres para viver em um plano que não pode ser vivido sem a presença de tão nobre sentimento.

A faculdade de recordar é uma grande aliada no cultivo do sentimento de gratidão. Recordar é fazer retornar ao coração o que nele já esteve. Recordo os momentos vividos comigo mesmo, as lutas oriundas das dúvidas quando a vontade nem sempre se fazia presente. Recordo o desprendimento de familiares, quando absorvido pelos estudos privava-os de minha presença. Dos colegas, companheiros de caminhada que sempre apresentaram um aporte positivo para a conquista do objetivo final, em especial à *Silvia Fagundes*.

Sou muito grato à Professora *Thais Russomano* que me orientou nessa árdua etapa de ser uma pesquisadora. Com suas oportunas observações, com seu tino de pesquisador soube dar a um conjunto de expectativas, dúvidas e incertezas a culminação feliz desse trabalho.

Sou eternamente grato aos meus pais, ter nascido para essa vida é o maior benefício que pode receber o espírito humano. Meus pais me propiciaram essa oportunidade. Aprendi com a *Dona Eliane*, a fibra para lutar, e com *Senhor Carlos* o encanto de viver aprendendo com a vida. Aos meus dois irmãos *Diogo* e *Tárik* e *minha avó Iolanda*, pelo amor incondicional, pelas doces palavras. Deus sabe o quanto eu os amo.



O matrimônio, a mais transcendental de todas as empresas, é um grande desafio para matemáticos. É um caso em que a divisão resulta sempre maior que o que foi dividido. Dividir minha vida com meu esposo a ampliou muitas vezes mais. Sou muito grata ao *Maurício Machado da Rosa*, meu esposo, amado, que aprecia e incentiva a lançar-me em vãos mais altos e maiores.

Sou grata também á uma amigo muito querido, pelo Don de interpretar e construir *Felipe Falcão*, que me auxiliou na construção e confecção de materiais para esse trabalho. Coisas simples mas que se tornam muito complicadas quando se está no meio de uma investigação.

Elaborar essa página de agradecimentos foi um dos melhores momentos vividos em torno desse trabalho. Não poderia deixar de agradecer também a um ser que estando comigo nem sempre tem liberdade para participar de minha vida, mas sei que sem ele não teria a graça de estar pensando e sentindo nesse momento; meu Espírito.

## RESUMO

Centrífugas humanas têm sido utilizadas para treinamento de pilotos e em testes com trajes anti-G, que são utilizados para minimizar os efeitos da hipergravidade simulada na fisiologia humana.

A centrífuga de pequeno porte do Centro de Microgravidade/PUCRS realiza algumas funções determinadas, enquanto o microcomputador capta os dados emitidos por ela. Estes dados correspondem aos enviados pelos diversos sensores existentes na centrífuga e aos novos sensores adicionados neste trabalho. Estes sensores fornecem dados no microcomputador de forma integrada, em tempo próximo ao real, para serem analisadas posteriormente.

Após estabilizar-se a velocidade da centrífuga de pequeno porte e esta não sofrer variações, o valor colhido do sensor de velocidade é então confrontado com o valor obtido no tacômetro. Prosseguiu-se com o processo de aferição dos instrumentos e a sincronização entre todos os sensores e placas.

Para a comunicação assíncrona entre o módulo de recepção dos sinais vindos via enlace de rádio, foi usada uma biblioteca de funções de comunicação com a porta serial, chamada ComPort Library versão 2.64. Esta biblioteca está disponível para uso sem custos.

**Palavras-chave: CENTRÍFUGA, SENSORES, MONITORAMENTO DE AMBIENTE.**

## ABSTRACT

*Human centrifuges had been used to train pilots and test anti-g suits, which were developed to reduce the effects of the simulated hypergravity on human physiology.*

*The small centrifuge of the Microgravity Center/PUCRS has some determined functions, while the microcomputer captures the data sent from it. This data corresponds to that obtained from various sensors already existing in the centrifuge, and to others that have been added during this study. These sensors supply information to microcomputer in an integrated form, in near real time, for future analyse.*

*A library of functions for serial port communication, called ComPort Library version 2.64, was used for the asynchronous communication between the reception's module of the signs acquired by the radio's enlace. This is a non-cost library. Initially, it was planed to be a shareware library, but it ultimately became a freeware library with available source codes, which are compatible with version 7.0 of Delphi™ that was used in this project.*

**Key-words: CENTRÍFUGE, SENSORS, ENVIRONMENT MONITOR.**

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 01 – Representação esquemática do vagão de trem.....  | 10 |
| Figura 02 – Efeito da força gravitacional sobre a trajetória dos astros celestes....                 | 11 |
| Figura 03 – Vetores de força considerando a referência. ....   | 15 |
| Figura 04 – Representação das direções e módulos de velocidade durante MCU.<br>.....                 | 17 |
| Figura 05 – Sentidos da aceleração.....  | 24 |
| Figura 06 – Sintomas causados pela força G em relação à intensidade e ao tempo<br>de exposição. .... | 27 |
| Figura 07 – Astronautas acomodados no interior de uma cápsula Gemini. ....                           | 30 |
| Figura 08 – Traje anti-G Mark 4A. ....   | 33 |
| Figura 09 – Centrífuga Humana Auto Propulsada da Nasa .....  | 34 |
| Figura 10 – Centrífuga usada para tratamento de histeria .....                                       | 36 |
| Figura 11 – Esquemático de uma máquina de um parque de diversões.....                                | 37 |
| Figura 12 – Centrífuga de Teste de Pilotos.....  | 39 |
| Figura 13 – Centrífuga humana de Farnborough. ....   | 40 |
| Figura 14 – Centrífuga humana de Farnborough, destaque da gôndola.....                               | 41 |
| Figura 15 – Centrífuga da Polonesa.....  | 42 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 16 – Centrífuga da Agência Espacial Russa .....                                 | 43 |
| Figura 17 – Centrífuga Espanhola.....  | 44 |
| Figura 18 – Centrífuga de pequeno porte. ....  | 48 |
| Figura 19 – Centrífuga de pequeno porte vista de frente. ....                          | 49 |
| Figura 20 – Peça central do braço da Centrífuga.....                                   | 50 |
| Figura 21 – Câmera sensível ao espectro infravermelho. ....                            | 51 |
| Figura 22 – <i>VídeoLink</i> . ....  | 52 |
| Figura 23 – <i>Dazzle 90</i> , dispositivo de captura de vídeo .....                   | 53 |
| Figura 24 – A fonte de alimentação.....  | 54 |
| Figura 25 – Centrífuga de pequeno porte com todos os sensores e equipamentos.<br>..... | 54 |
| Figura 26 – Braço da centrífuga, com a gôndola na extremidade do braço .....           | 55 |
| Figura 27 – Centrífuga de pequeno porte com o contra peso e a gôndola. ....            | 56 |
| Figura 28 – Suporte do Corpo de Prova.....   | 57 |
| Figura 29 – Desenho da gôndola fixada na centrífuga.....                               | 59 |
| Figura 30 – Protótipo II da gôndola em material PVC. ....                              | 60 |
| Figura 31 – Desenho da versão final da gôndola. ....                                   | 61 |
| Figura 32 - Croqui da gôndola, dimensões em milímetros. ....                           | 62 |
| Figura 33 – A gôndola vista lateralmente. ....   | 62 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 34 – Imagem dos sensores acoplados junto à gôndola. ....             | 63 |
| Figura 35 - Sensor de Pressão Atmosférica.....                              | 64 |
| Figura 36 - Imagens da gôndola sendo testada no túnel de vento.....         | 66 |
| Figura 37 – Sensor de temperatura e umidade SHT71.....                      | 67 |
| Figura 38 – Diagrama Temporal do protocolo de comunicação do SHT71.....     | 68 |
| Figura 39 – Diagrama de Blocos do nRF2401. ....                             | 70 |
| Figura 40 – Vistas do <i>transceiver</i> TRW24G.....                        | 70 |
| Figura 40 - Esquema elétrico do adaptador para o TRW24G. ....               | 71 |
| Figura 42a – Montagem final do adaptador do transceiver: vista 1.....       | 71 |
| Figura 42b – Montagem final do adaptador do transceiver: vista 2.....       | 72 |
| Figura 43 - Circuito de mensuração da aceleração.....                       | 73 |
| Figura 44 – Diagrama de blocos do MSP430f149.....                           | 75 |
| Figura 45 – Diagrama dos pinos do MSP430f149.....                           | 76 |
| Figura 46 – Diagrama esquemático da placa do micro-controlador. ....        | 77 |
| Figura 47 – Placa do micro-controlador montada.....                         | 78 |
| Figura 48 – Caixa de proteção dos circuitos da gôndola: visão externa. .... | 79 |
| Figura 49 – Circuito micro-controlador da centrífuga. ....                  | 80 |
| Figura 50 – Fixação do Vídeo Link na tampa da caixa de proteção.....        | 81 |
| Figura 51 – Circuito micro-controlador de recepção.....                     | 82 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 52 – Ambiente de trabalho externo à centrífuga. ....          | 83 |
| Figura 53 - ECG with Right-Leg Drive .....                           | 84 |
| Figura 54 – Demonstração da tela principal do programa.....          | 85 |
| Figura 55 – Janela de visualização das imagens da gôndola. ....      | 86 |
| Figura 56 – Tela do computador com o programa em execução. ....      | 87 |
| Figura 57 – Demonstração da pressão interna em Função do Tempo. .... | 90 |
| Figura 58 – Demonstração da temperatura em função do tempo. ....     | 91 |
| Figura 59 – Demonstração da Umidade em Função do tempo.....          | 92 |
| Figura 60 – Demonstração da aceleração em função do tempo. ....      | 93 |
| Figura 61 – Demonstração do RPM em função do tempo. ....             | 93 |
| Figura 62 – Gráfico do ECG gerado a partir dos dados gravados.....   | 94 |
| Figura 63 – Desempenho do corpo de prova no interior da gôndola..... | 95 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 01 – Valores obtidos dos sensores e gravados pelo programa..... | 89 |
|--|----|



## LISTA DE EQUAÇÕES

|  |     |
|--|-----|
| Equação 01 – <i>Força Gravitacional</i> .....                    | 12  |
| Equação 02 – <i>Peso</i> .....                                   | 13  |
| Equação 03 – <i>Peso Aparente</i> .....                          | 16  |
| Equação 04 – <i>Força Centrípeta</i> .....                       | 17  |
| Equação 05 – <i>Cálculo da RPM ideal para 7G</i> .....           | 98  |
| Equação 06 – <i>Momento de Inércia do Braço da Gôndola</i> ..... | 99  |
| Equação 07 – <i>Momento de Inércia da Gôndola</i> .....          | 99  |
| Equação 08 – <i>Momento de Inércia Total</i> .....               | 100 |
| Equação 09 – <i>Torque do Motor</i> .....                        | 100 |
| Equação 10 – <i>Potência do Motor</i> .....                      | 101 |

## LISTA DE SIGLAS

AM – Amplitude Modulada

CRC – Cyclic Redundancy Check

ECG – Eletro Cardiograma

G-LOC – G Induced Loss of Consciousness

IPCT – Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas

MCU – Movimento Circular Uniforme

MRU – Movimento Retilíneo Uniforme

PPB – Positive Pressure Bump

PUC-RS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

USB – Universal Serial Buss

VHF – Very High Frequency

VHS – Vertical Helical Scan or Video Home System

TV – Television

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$  – Aceleração

bpm – Batimento por minuto

$F$  – Força

FCP – Força Centrípeta

FG – Força G

G – Unidade de medição da Força G

G – Constante Universal postulada por Henry Cavendish

$g$  – Aceleração gravitacional

g – grama

GHz – Giga Hertz

$G_x$  – Força G medida no eixo corporal  $x$

$G_y$  – Força G medida no eixo corporal  $y$

$G_{z+}$  – Força G medida no eixo corporal  $z$  no sentido topo base

$G_{z-}$  – Força G medida no eixo corporal  $z$  no sentido base topo

kbps – Quilo bits por segundo

kg – Quilograma

kHz – Quilo Hertz

km – Quilômetro

$m$  – Massa

m – Metro

mm - Milímetro

MB – Mega Byte

MHz – Mega Hertz

ms – milissegundo

mV - milivolt

N – Newton

N – Força Normal

rpm – Rotações por Minuto

s – Segundo

W – Peso

W – *Watts*

$\omega$  – Velocidade angular medida em rad/s

V – Velocidade

V – Voltagem

$r$  – Raio

rad/s – Radianos por segundo

## ÍNDICE

|  |      |
|--|------|
| DEDICATÓRIA.....                         | iii  |
| AGRADECIMENTOS .....                     | iv   |
| RESUMO.....                              | vi   |
| ABSTRACT .....                           | vii  |
| LISTA DE FIGURAS .....                   | viii |
| LISTA DE TABELAS .....                   | xii  |
| LISTA DE EQUAÇÕES .....                  | xiii |
| LISTA DE SIGLAS .....                    | xiv  |
| LISTA DE SÍMBOLOS.....                   | xv   |
| ÍNDICE .....                             | xvii |
| INTRODUÇÃO .....                         | 1    |
| JUSTIFICATIVA.....                       | 3    |
| OBJETIVOS .....                          | 5    |
| OBJETIVO GERAL.....                      | 5    |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....               | 5    |
| CAPÍTULO I – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... | 7    |
| 1.1 FÍSICA .....                         | 7    |
| 1.1.1 Força.....                         | 7    |

|   |    |
|---|----|
| 1.1.2 Massa.....  | 7  |
| 1.1.3 Aceleração .....  | 8  |
| 1.1.4 Força Centrífuga .....  | 9  |
| 1.1.5 Força Gravitacional .....   | 11 |
| 1.1.6 Sistemas Referenciais.....  | 12 |
| 1.1.7 Princípio de Equivalência.....                                    | 13 |
| 1.1.8 Peso .....  | 13 |
| 1.1.9 Peso Aparente .....   | 14 |
| 1.1.10 Força Normal .....   | 14 |
| 1.1.11 Movimento Circular Uniforme - MCU.....                           | 16 |
| 1.1.12 Microgravidade ou Gravidade Reduzida e Gravidade artificial..... | 18 |
| 1.1.13 Hipergravidade .....   | 20 |
| 1.1.14 Força G .....  | 21 |
| 1.2 Biomedicina Aeroespacial.....                                       | 22 |
| 1.2.1 Nomenclatura Fisiológica dos eixos da Força G .....               | 23 |
| 1.2.2 Tolerância Humana a Força-G .....                                 | 24 |
| 1.2.3 Efeitos Fisiológicos de uma Aceleração +Gz .....                  | 25 |
| 1.2.3.1 Grey-out e Black-out.....                                       | 26 |
| 1.2.3.2 PERDA DA CONSCIÊNCIA INDUZIDA.....                              | 28 |

|   |    |
|---|----|
| 1.2.4 Efeitos Fisiológicos de uma Aceleração -Gz .....          | 29 |
| 1.2.5 Efeitos Fisiológicos de uma Aceleração Gx e Gy .....      | 30 |
| 1.2.6 Métodos de contra-medida aos Efeitos da Força +Gz .....   | 31 |
| 1.2.6.1 Inclinação do Aumento da Aeronave .....                 | 31 |
| 1.2.6.2 Traje Anti-G .....                                      | 32 |
| 1.2.6.3 Positive Pressure Breathing - PBB .....                 | 33 |
| 1.3 Centrífugas Humanas .....                                   | 34 |
| CAPÍTULO II – METODOLOGIA.....                                  | 45 |
| 2.1 INSTRUMENTOS UTILIZADOS .....                               | 46 |
| 2.1.1 - Equipamentos .....                                      | 46 |
| 2.1.2 - Centrífuga de Pequeno Porte e demais Dispositivos ..... | 47 |
| 2.2 MODIFICAÇÕES E CONFECÇÃO DE EQUIPAMENTOS .....              | 55 |
| 2.2.1 Adaptação do Braço da Centrífuga .....                    | 55 |
| 2.2.2 Protótipo I da Gôndola .....                              | 57 |
| 2.2.3 Protótipo II da Gôndola .....                             | 60 |
| 2.2.4 Instrumentação do protótipo II.....                       | 63 |
| 2.2.4.1 Sensor de Pressão Atmosférica .....                     | 64 |
| 2.2.4.2 Sensor Temperatura e Umidade.....                       | 67 |
| 2.2.4.3 Transceiver de Rádio Freqüência.....                    | 69 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.2.4.4 Acelerômetro MMA3202D .....                      | 72  |
| 2.2.4.5 Circuito de RPM.....                             | 73  |
| 2.2.4.6 Micro-controlador.....                           | 73  |
| 2.2.4.7 Caixa de Proteção dos Circuitos da Gôndola ..... | 78  |
| 2.2.4.8 Equipamentos Externos à Centrífuga .....         | 81  |
| 2.2.4.9 Sistema de Monitoramento Biomédico .....         | 83  |
| 2.3 Software Desenvolvido .....                          | 84  |
| CAPÍTULO III – RESULTADOS .....                          | 88  |
| 3.1 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS.....                 | 88  |
| 3.2 Análise das Imagens do Corpo de Prova.....           | 94  |
| CAPÍTULO IV – CONCLUSÃO .....                            | 97  |
| ESTUDOS FUTUROS.....                                     | 103 |
| REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....                          | 104 |



## INTRODUÇÃO

Esta dissertação visou à construção de uma gôndola para ser utilizada com a centrífuga de pequeno porte do Centro de Microgravidade/FENG-PUCRS. Esta centrífuga foi desenvolvida como dissertação de mestrado por Rodrigo Pessano Coelho - *Desenvolvimento de Centrífugas para Experimentos em Hipergravidade* (COELHO, 2005). Logo após a conclusão da centrífuga, a dissertação de mestrado de Maurício Machado da Rosa - *Desenvolvimento de um Sistema de Comunicação e Monitoramento de Centrífugas* (ROSA, 2005) - acrescentou o monitoramento de áudio, vídeo, medição da velocidade angular e cálculo da força-G atuante sobre o corpo de prova.

Para complementar o que já foi desenvolvido, aprimorou-se com a implementação do monitoramento do ambiente do corpo de prova por meio da adição de sensores de temperatura, pressão, umidade e acompanhamento da frequência cardíaca, juntamente com a construção de uma gôndola. Por meio desta gôndola, elaborou-se um ambiente capaz de expor materiais e organismos vivos a acelerações elevadas com o monitoramento das reações comportamentais e fisiológicas.

A centrífuga de pequeno porte do Centro de Microgravidade realiza algumas funções determinadas, enquanto o micro computador capta os dados emitidos por ela. Estes dados correspondem aos enviados pelos diversos sensores existentes na centrífuga e os novos sensores adicionados neste trabalho.

Com a perspectiva do aumento crescente de missões espaciais tripuladas de curta e longa duração, torna-se cada vez mais importante o conhecimento dos efeitos do ambiente espacial modificado – notadamente o interior das naves espaciais – sobre o organismo humano. Não subestimando a importância dos outros fatores ambientais, como radiações cósmicas, a atmosfera artificial das espaçonaves (e das vestimentas para atividades extra-veiculares), a ausência de ciclo claro/escuro natural, o confinamento, a virtual ausência de gravidade é certamente a maior causa de alterações fisiológicas e doenças reconhecidas até hoje nos astronautas e animais de experimentação lançados ao espaço. Neste contexto, não é demais lembrar a presença de outros fenômenos, como os +Gz em que estes organismos ficam expostos durante a fase de decolagem e de retorno à Terra, bem como pilotos militares em situação de combate.

Fisiologistas aeronáuticos após a Segunda Guerra Mundial identificaram nos pilotos de combate um fenômeno conhecido como perda da visão momentânea o “*black-out*” (WUBBELS, 2002). Com objetivo de estudar este fenômeno, desenvolveram métodos de proteger os pilotos durante estas manobras, construindo centrífugas humanas nos Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Rússia e Japão. Devido à urgência para pô-las em operação, as centrífugas eram pequenas, e seu braço variava de três a sete metros. Suas acelerações eram lentas, conseqüentemente não simulavam as condições reais as quais os pilotos eram submetidos em vôo real (VERNIKOS, 1996).

Mas os conhecimentos na área da fisiologia aumentaram com o passar dos anos, tanto que, em 1994, começou a ser projetada as especificações para uma

centrífuga de alta performance, que simularia com mais realismo o estresse experimentado por pilotos em combate (WUBBELS, et all, 2002).

Juntamente com uma equipe de engenheiros e médicos, o Dr. Ralph Christy (COELHO, 2005) conseguiu finalizar o desenho da nova centrífuga, dando origem a novos modelos, mais sofisticados, conhecidos também como “Simuladores de Vôo Dinâmicos”.

Alguns conceitos de física se fazem necessários para o entendimento do funcionamento da centrífuga e fundamental para o experimento.

## **JUSTIFICATIVA**

Uma gôndola torna-se um dispositivo eficaz para a aquisição de conhecimentos necessários que envolvem uma centrífuga humana (WUBBELS, et all, 2002) (GAZENKO, GRICOR'EV, EGORV, 1997). Além de permitir a realização de pesquisas, ele será um bom simulador de hipergravidade para fins didáticos em sala de aula.

Ferramentas como as centrífugas permitem simular condições de aceleração semelhantes às encontradas em vôos de alta performance, vôos espaciais e em aeronaves de alto desempenho rotineiros.

A presente dissertação, denominada **Desenvolvimento de uma Gôndola para Realização de Experimentos em uma Centrífuga de Pequeno Porte**, justifica-se principalmente pela necessidade de se aprimorar o conhecimento relativo à força G e ao uso de centrífugas no Brasil e na América Latina, como um

todo. A implantação de um sistema de testes de pilotos de aeronaves quanto a sua resistência à Força G, atuante sobre seus corpos durante manobras aéreas em aeronaves de combate é vital para países que ainda não têm acesso a esta tecnologia.

O desenvolvimento de protocolos de testes, que visam aumentar a tolerância à Força G pelo emprego de técnicas e equipamento anti-G que aumentam a resistência do piloto, são de suma importância nacional devido à inexistência tanto em nosso país quanto em países vizinhos, tornando este projeto, portanto, pioneiro na América do Sul nesta área de conhecimento.

#### ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO:

- O primeiro capítulo é destinado à exposição dos conteúdos referentes à revisão da literatura, enfatizando os conceitos físicos.
- O segundo aborda a metodologia utilizada na pesquisa, desde os instrumentos e os equipamentos desenvolvidos, os estudos preliminares e principais, a coleta de dados e a determinação das variáveis.
- O terceiro capítulo é referente aos resultados e discussão.
- O quarto apresenta conclusão contendo propostas para estudos futuros.
- Por fim, as referências bibliográficas utilizadas na confecção desta dissertação de mestrado.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GERAL

Aperfeiçoar a centrífuga de pequeno porte do Centro de Microgravidade/FENG-PUCRS, com a construção de uma gôndola posicionada na extremidade do braço da centrífuga, juntamente com o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de frequência cardíaca do corpo de prova, e sensores para aferição da temperatura, umidade e pressão.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Construção de uma gôndola para comportar um animal de pequeno porte como corpo de prova, bem como plantas e culturas de células;
2. Implementação e teste quanto ao formato e estrutura da gôndola;
3. Adição de eletrodos para monitoração da frequência cardíaca do corpo de prova;
4. Adição, na centrífuga, de um circuito para amplificar o sinal do sensor de frequência cardíaca;
5. Alteração do circuito existente de transmissão de informação via rádio, em frequência AM, para envio dos dados do acelerômetro juntamente com os dados do sensor de frequência cardíaca amplificado;

6. Adição de sensores de monitoramento do ambiente interno da gôndola, sensor de pressão, umidade, temperatura, aceleração;
7. Alteração do programa existente de monitoramento da centrífuga para que este possa separar as informações enviadas da centrífuga, correspondente aos dados do acelerômetro e frequência cardíaca, e disponibilizá-las na tela do computador;
8. Alteração do programa existente para disponibilizar as informações da centrífuga em uma janela e em outra o vídeo capturado pela câmera infravermelha.

## CAPÍTULO I – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 FÍSICA

#### 1.1.1 Força

A força é uma influência externa que provoca a aceleração de um corpo em um referencial inercial. A força é o produto da massa inercial do corpo e da aceleração (RESNICK, 1991 in ROSA, 2005). A direção resultante da força é a direção da aceleração que a mesma produz em um determinado corpo.

#### 1.1.2 Massa

Representa a quantidade de matéria de um corpo, e conceitualmente apresenta duas classificações: massa gravitacional e massa inercial (ALONSO; FINN, 1972). A massa gravitacional de um corpo é aquela responsável pela força de atração de natureza gravitacional que ele exerce sobre outro corpo e é descrita pela fórmula da força gravitacional de Newton e Cavendish. Já a massa inercial de um corpo pode ser conceituada como a sua resistência à aceleração (BERR, 1991). Quanto maior for a massa de um corpo, maior será sua inércia. Por

exemplo, se uma mesma força for aplicada a dois corpos, o que possuir maior massa será menos acelerado (BERR, 1991).

O fato de a força gravitacional exercida sobre um corpo ser proporcional à sua massa inercial é uma característica ímpar da força da gravidade. Este fenômeno faz com que dois corpos quaisquer, sobre a ação gravitacional do planeta Terra, que se encontrem à mesma distância do seu centro de massa, sejam atraídos com a mesma intensidade (ALONSO; FINN, 1972); (BERR, 1991).

### **1.1.3 Aceleração**

A grandeza que atrai com a mesma intensidade dois corpos quaisquer, independentemente da quantidade de massa que estes possuam é chamada de aceleração.

Considerando-se um elefante de massa igual a 700 *kg* na superfície da Terra, através da fórmula da gravitação universal, pode-se calcular qual é a força de atração entre a Terra e o animal, levando-se em conta a constante de gravitação universal *G*, a massa do planeta, a massa do elefante e a distância que separa seus centros de massa. Para efeito meramente ilustrativo, será considerado que a força gravitacional calculada neste caso seja igual a 6860*N* (WUBBELS. SONDAG, VAN MARLE; in JONG H. A. A., 2002).

O valor descrito representa a intensidade com que o planeta e o elefante se atraem. Conseqüentemente, esta atração resultará na aceleração dos corpos, um em direção ao outro. Como a massa inercial do planeta é “infinitamente” maior do



que a do elefante, a sua resistência à aceleração também o será, e por isso é que o elefante é que cai sobre a Terra e não o contrário.

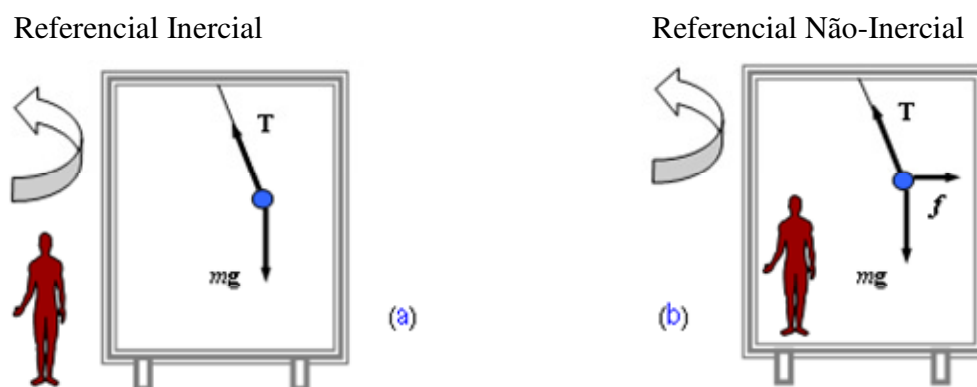
Ao invés do que se possa pensar inicialmente, um objeto com maior massa não possuirá uma força gravitacional maior e conseqüentemente não possuirá uma aceleração maior. Devido à dupla característica da massa, de criar uma força gravitacional e de possuir inércia, a aceleração gravitacional calculada de um elefante na superfície da Terra, que é aproximadamente de  $9,8\text{m/s}^2$ , representa uma constante para qualquer objeto na mesma situação. Isso porque, na proporção em que a força de atração gravitacional entre um objeto e o planeta cresce de acordo com o aumento da massa do objeto, cresce também a sua inércia, ou resistência ao avanço (SAND, 2003 apud COELHO, 2005).

Um objeto que possua uma massa dez vezes menor do que a do elefante, por exemplo, uma pessoa de massa igual a 70 kg, possuirá uma força gravitacional também dez vezes menor (686N) e sua inércia também será menor na mesma proporção, o que faz com que ele seja acelerado com a mesma intensidade (GIERNRATH, 2005 apud COELHO, 2005).

#### **1.1.4 Força Centrífuga**

O conceito de *força centrífuga*, caso especial de *força inercial*, pode ser entendido com o auxílio do vagão de trem da Figura 01, que descreve uma curva para a esquerda, em movimento circular uniforme (MCU). Uma esfera de massa  $m$  está presa ao teto do vagão por uma corda. Um observador, em terra, considera

que a deflexão observada na corda deve-se simplesmente à tendência da esfera de manter seu estado de inércia. No entanto, um observador no interior do vagão vê a esfera como se uma força  $f$ , atuando sobre ela, fosse a responsável pela deflexão da corda. Essa *força inercial*  $f$ , atuando “para fora” e perpendicular à tangente à curva descrita pela esfera, é tradicionalmente denominada de *força centrífuga* (BACELAR, 1997 apud COELHO, 2005; ROSA, 2005).



**Figura 01 – Representação esquemática do vagão de trem.**

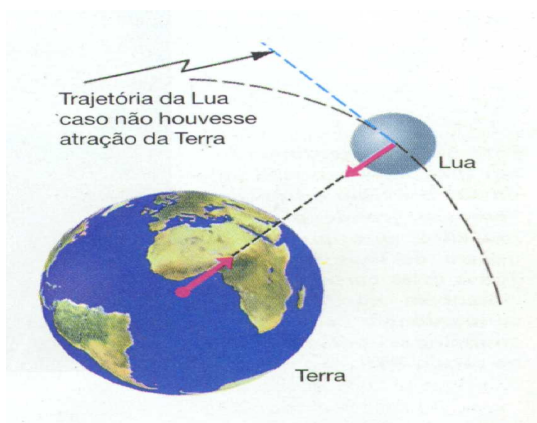
<http://paginas.terra.com.br/educacao/fgravidade>

A Figura 01 apresenta a visão esquematizada de uma esfera de massa  $m$  que está sujeita à aceleração da gravidade  $g$ . Esta esfera está presa ao teto do vagão por uma corda, com uma tração  $T$ .

No exemplo (a), um observador inercial, em relação ao solo, observa a esfera fazer a curva, junto com o vagão, com uma aceleração centrípeta dada pela componente horizontal de  $T$ . Para um observador dentro do vagão (b), que sofre a mesma aceleração deste, a esfera está em equilíbrio e, por isso, existe uma força fictícia  $f$  que equilibra a componente horizontal de  $T$ .

### 1.1.5 Força Gravitacional

A Força Gravitacional, descrita pela Lei da Gravitação Universal, foi postulada pelo físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727). Estudando o movimento dos planetas, Newton observou que, como eles descrevem órbitas em torno do Sol, assim como a Lua em torno da Terra, esses astros deveriam estar sujeitos a uma força de atração de algum tipo, do contrário, suas trajetórias não seriam curvas, mas retilíneas (Figura 02) (SERWAY, 1992 apud COELHO, 2005 apud in ROSA).



**Figura 02 – Efeito da força gravitacional sobre a trajetória dos astros celestes.** (MAXIMO, 2000)

Segundo a lenda, Newton, ao observar uma maçã caindo ao solo, entendeu que a força que mantém os planetas em órbita e a força que puxou a maçã para baixo possuíam a mesma natureza e que não seriam exclusivas a esses sistemas,

mas sim que essa força de atração deveria ser um fenômeno geral (universal) e manifestar-se-ia entre dois objetos quaisquer. Após alguns anos de estudo e coleta de dados, Newton publicou a Lei da Gravitação Universal em sua obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), onde afirmava que dois sistemas quaisquer se atraem com uma força proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles, sendo esta força de atração descrita pela seguinte fórmula:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad \text{Equação 01}$$

Onde  $m_1$  e  $m_2$  são as massas dos corpos,  $d$  é a distância entre eles e  $G$  é a constante de gravitação universal, cujo valor é de  $6,67 \times 10^{-11}$  N. m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>. A distância entre dois corpos é considerada como sendo a distância entre seus centros de massa (SERWAY, 1992 apud COELHO, 2005; ROSA, 2005).

### 1.1.6 Sistemas Referenciais

A primeira lei de Newton não faz distinção entre um corpo estar em repouso ou estar em movimento retilíneo uniforme (MRU). O fato de um corpo estar em um ou outro estado vai depender do referencial (sistema de coordenadas) em que o corpo é observado (BERR; RUSSEL, 1991).

### 1.1.7 Princípio de Equivalência

O princípio da equivalência foi postulado pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955) e atesta que as propriedades inércias e gravitacionais da massa são equivalentes entre si. Esta afirmação implica que gravitação e aceleração são equivalentes, isto é, os efeitos da aceleração gravitacional aos quais um corpo ou sistema está submetido em um determinado referencial inercial são equivalentes aos efeitos de uma aceleração de outra natureza qualquer sobre o mesmo corpo em um referencial não-inercial.

### 1.1.8 Peso

Peso é a força produzida por uma aceleração de origem gravitacional sobre uma massa qualquer, podendo ser representado pela letra  $W$  e descrita pela fórmula:

$$W = m * g \quad \text{Equação 02}$$

onde  $m$  representa a massa e  $g$  corresponde a aceleração gravitacional (WUBBELS, SONDAG VAN MARLE; in JONG H. A. A., 2002).

O planeta Terra, devido à força gravitacional produzida por sua grande massa, faz com que todos os corpos no seu campo de influência gravitacional possuam peso. É possível verificar que a aceleração gravitacional que um corpo causa sobre outro é diretamente proporcional à sua massa, isto significa que

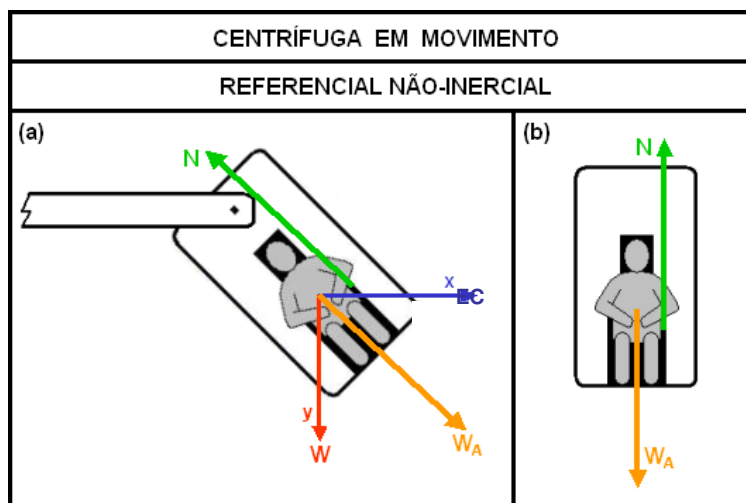
quanto maior a massa do corpo maior será a atração exercida por ele. O peso de um objeto decresce com o aumento da sua distância em relação ao centro de massa do corpo de maior peso.

### **1.1.9 Peso Aparente**

A quantidade de massa do passageiro não varia, enquanto a força centrífuga varia diretamente com a velocidade angular. Então, quanto maior a velocidade de rotação da centrífuga, maior será o peso aparente do passageiro. Segundo Einstein predisse, o passageiro que estivesse no interior da gôndola sem nenhuma referência visual externa, teria simplesmente a impressão de ter seu peso aumentado (GASPAR, 2000). À medida que a centrífuga ganha velocidade de rotação, o passageiro da gôndola é levado a acreditar que estaria submetido a uma força gravitacional com uma aceleração maior do que a aceleração normal da Terra ( $a=9.81\text{m/s}^2$ ) tornando seu peso maior do que quando estava inerte em solo terrestre (BERR & RUSSELL, 1991; GASPAR, 2000).

### **1.1.10 Força Normal**

A Figura 03 apresenta o esquemático da gôndola da centrífuga em movimento onde há um passageiro (corpo de prova) sendo analisado em um referencial não inercial.



**Figura 03 – (a) Vetores de força considerando referências externas. (b) Vetores de força sentidos pelo passageiro, sem referência externa.**

Na situação (a) estão descritos os vetores de força percebidos quando o passageiro possui referências externas, assim é possível ao passageiro perceber que a gôndola inclina-se cada vez mais à medida que a centrífuga acelera seu movimento.

A situação (b) descreve os vetores de força sentidos pelo passageiro, sem que este tenha alguma referência visual do ambiente exterior, neste caso, o único vetor percebido é o peso aparente que, devido a Força Centrípeta (Equação-03), faz com que o passageiro tenha a sensação aparente de estar mais pesado do que quando estava em repouso no solo terrestre.

Para calcular o valor do peso aparente basta usar o teorema de Pitágoras, o qual atesta que a soma dos quadrados dos catetos é igual ao quadrado da hipotenusa. Na Figura 03, as forças atuantes no sistema em um referencial

acelerado formam um triângulo retângulo, onde o peso aparente é a hipotenusa e os catetos são formados pelo peso e pela força centrífuga.

Assim temos:

$$Wa^2 = W^2 + F_{cp}^2 \quad \textbf{Equação 03}$$

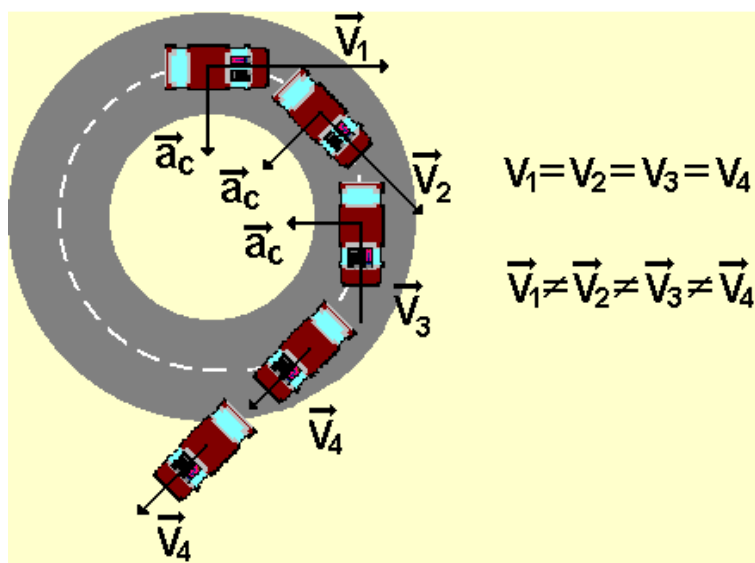
O módulo da força centrífuga pode ser calculado através da Equação-03, uma vez que a diferença entre a força centrípeta e a centrífuga está apenas no referencial.

#### **1.1.11 Movimento Circular Uniforme - MCU**

Para o corpo sair do seu estado natural, em repouso ou em movimento retilíneo uniforme (MRU) e descrever uma trajetória circular é preciso que uma força atue sobre ele. Esta força, chamada de Força Centrípeta, é orientada para um centro fixo e responsável por fazer o objeto descrever uma trajetória curvilínea.

O movimento circular executado com velocidade constante em módulo formará um ângulo reto com a trajetória do objeto em movimento, acelerando-o para o centro da curva. A aceleração centrípeta muda continuamente a direção do vetor velocidade do objeto, levando-o a descrever uma trajetória circular. A Figura 04 mostra um objeto em MCU em três momentos diferentes. Embora o módulo da velocidade seja igual nos três instantes ( $v_1 = v_2 = v_3$ ), a direção muda constantemente devido à aceleração centrípeta.





**Figura 04 – Representação das direções e módulos de velocidade durante MCU.**

Projeto Educar – Mecânica Gráfica- <http://educar.sc.usp.br/fisica/circteo.html>

Caso a força centrípeta cesse, o corpo tenderá por inércia a manter um MRU relativo ao momento em que ela cessou, seguindo assim em uma direção tangencial ao seu antigo movimento (BERR & RUSSELL, 1991).

A Equação-04 descrita abaixo representa a força centrípeta, e esta será muito útil para o cálculo da força G atuante sobre o corpo de prova na centrífuga.

$$F_{cp} = m * \omega^2 * r \quad \text{Equação 04}$$

Onde  $m$  representa a massa do corpo de prova,  $\omega$  corresponde a velocidade angular em radianos por segundo, e  $r$  é o raio da curva, que no caso da centrífuga é a distância que o corpo de prova se encontra em relação o centro de rotação (VERNIKOS, 1972).

Quando o MCU de um objeto é analisado, o comportamento do objeto é completamente compreensível, e um observador de um referencial inercial poderá comprovar que o movimento do corpo deve-se ao fato de o mesmo estar sob a ação de uma força que o puxa para o centro da curva, uma força centrípeta. Este corpo tende a seguir uma trajetória tangencial ao movimento circular devido à sua inércia, o que acontecerá caso a força centrípeta acabe, como descrito pelas leis de Newton.

Caso este mesmo MCU seja observado a partir de um referencial acelerado, ou não-inercial, o observador será obrigado a introduzir forças fictícias a fim de garantir a validade das leis newtonianas. Como no caso já citado da Figura 01, o observador fixo no interior do vagão (referencial não-inercial) acredita na existência de uma força que puxa o peso amarrado ao teto para fora da curva, dando-lhe o nome de força centrífuga. A força centrífuga é, então, uma pseudo força, uma força de origem inercial, criada para validar as leis de Newton em um referencial acelerado, tornando-o assim equivalente a um referencial inercial, segundo o princípio da equivalência de Einstein (GASPAR, 2000).

#### **1.1.12 Microgravidade ou Gravidade Reduzida e Gravidade artificial**

A força da gravidade é uma força constante e imutável que produz uma aceleração vertical, descendente e constante. Tal força provoca uma aceleração gravitacional na superfície terrestre de  $-9,81\text{m/s}^2$ , de grandeza negativa por convenção, já que o sentido para cima é positivo e para baixo, negativo

(HALL, 2000). A força gravitacional descrita por Isaac Newton (1642 -1727) foi apoiada no estudo de Johannes Kepler (1571-1630) referente ao movimento dos planetas. Newton publicou a Lei da Gravitação Universal, através da observação da existência de uma força de atração entre os planetas e o Sol e a Lua em relação à Terra, por permanecerem em órbita. Tal lei afirma que estes dois sistemas se atraem com uma força proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadro da distância entre os mesmos. Entretanto, a força entre dois objetos em superfície terrestre é muito pequena (TAVARES, 2003).

A microgravidade ou a gravidade reduzida não correspondem a uma gravidade nula (0G), apenas aparente falta de efeitos gravitacionais. A microgravidade é a ausência da força gravitacional significativa, tendo em vista que a força é diminuída e não anulada.

A aceleração gravitacional que atua sobre um ônibus espacial em órbita é de aproximadamente **8,8 m/s<sup>2</sup>** (a 300 km de altitude), ou seja, o valor da aceleração varia um pouco com a altitude em que o corpo se encontra e o veículo continuará em contínua queda livre em direção à Terra. Para evitar a queda do veículo na superfície terrestre, este orbitar o planeta em velocidade calculada, como o movimento de órbitas dos planetas em torno do Sol e da Lua em torno da Terra. O fenômeno de queda livre ou imponderabilidade pode igualmente ser a explicação para a simulação de microgravidade produzida nos vôos parabólicos, onde a aceleração gravitacional é igual à velocidade do deslocamento do corpo do

indivíduo, sugerindo a sensação de ausência de peso, de estar flutuando (TAVARES, 2000).

### **1.1.13 Hipergravidade**

A hipergravidade caracteriza-se por um peso aparente maior do que seu peso real. O princípio da Equivalência de EINSTEIN afirma que a aceleração produzida por uma força qualquer causa os mesmos efeitos sobre um corpo do que uma força de origem gravitacional o faria. Quando um corpo é acelerado com uma intensidade maior que  $g$ , ele é considerado, para efeito de cálculo, como estando submetido a uma força gravitacional maior que a força gravitacional terrestre.

No meio aeroespacial, estas situações são freqüentemente encontradas nos vôos orbitais, em suas fases de lançamento e re-entrada, assim como nos vôos de aeronaves acrobáticas e de alta performance, como os caças de combate. As forças que geram ambientes de hipergravidade e que são encontradas durante vôo também podem ser criadas em solo, através de centrífugas, cujo objetivo é exatamente treinar e condicionar pilotos e astronautas.

A ocorrência de um ambiente que simula a hipergravidade é devido ao aparecimento de uma força centrípeta. No solo, esta força é realizada pela tensão do braço da centrífuga, enquanto que em um vôo de trajetória circular, a força centrípeta é a própria força de sustentação gerada pelas asas das aeronaves. Em vôos espaciais, a força que cria a hipergravidade não é de origem centrípeta, mas

origina-se da aceleração ou desaceleração da espaçonave no sentido de sua trajetória.

Para analisar aspectos físicos envolvidos em uma situação de hipergravidade, deve-se observá-la através de um referencial inercial, para que as leis de movimento de Newton sejam válidas e não seja preciso criar forças fictícias para validá-las. Para observar-se o fenômeno do ponto de vista biomédico e fisiológico, pode-se compreender a partir de um referencial acelerado, onde as reais forças atuantes no sistema são desprezadas e substituídas por uma simples força gravitacional mais levada, a fim de explicar os acontecimentos decorrentes de tal situação.

#### **1.1.14 Força G**

Pelo fato de aceleração e gravitação serem equivalentes entre si, qualquer força pode ser expressa em quantidades de força gravitacional e a aceleração da gravidade pode ser considerada como uma constante para qualquer corpo na superfície da Terra (BERR & RUSSELL, 1991; GASPAR, 2000).

Sendo o módulo do peso aparente ( $W_a$ ) de um corpo equivalente a duas vezes o módulo do seu peso real, é possível afirmar que este mesmo corpo está sob a ação de uma força gravitacional duas vezes maior, então a aceleração gravitacional ( $g$ ) é igual a  $9,81 \text{ m/s}^2$  multiplicado por dois. Nestas condições é dito que o  $W_a$  corresponde a uma força de 2 G, logo, uma força equivalente a duas vezes a da gravidade terrestre. Neste caso, a força é referida como de 2 G, onde

G é a quantificação da força resultante em números de força gravitacional terrestre.

## **1.2 Biomedicina Aeroespacial**

Atualmente, vôos espaciais e em aeronaves de alto desempenho são rotineiros, sendo que um dos aspectos que possui grande importância na área da fisiologia humana é a exposição à aceleração a qual o piloto e/ou os tripulantes das aeronaves estão submetidos. Desde os primeiros vôos tripulados ao espaço, houve grande interesse a cerca dos efeitos sobre a fisiologia do corpo humano.

Tais efeitos incluíam o medo de colapsos cardiovasculares, disfunções gastrointestinais, desorientação espacial, reações de pânico, problemas oculomotores e a sensação “de estar sempre caindo”. Além da alteração do funcionamento de estruturas do Sistema Vestibular, verificam-se também modificações nos reflexos espinhais no indivíduo. Alterações do tecido ósseo e na estrutura do músculo, em propriedades de neurônios motores, e talvez na organização funcional cerebral também ocorram durante missões de mais longa duração (SHENDER, 2003 apud COELHO, 2005, ROSA, 2005; LACKNER, 2000).

Para proteger a tripulação dos efeitos da hipergravidade, foram criados dispositivos que aumentam a resistência e tolerância de pessoas comuns, já que estas podem suportar até  $\pm 9Gz$  em treinamento, como por exemplo, o “traje anti-G” e máscaras de oxigênio sob pressão positiva. O desenvolvimento de tais equipamentos, só foi possível graças às centrífugas, que permitem expor

peessoas e máquinas a uma elevada força gravitacional simulada a um baixo custo financeiro (ALBERY, 2004 apud ROSA, 2005).

### **1.2.1 Nomenclatura Fisiológica dos eixos da Força G**

A fim de evitar confusões nos estudos sobre os efeitos da força G na fisiologia humana, C. F. Gell introduziu em 1961 (WUBBELS, et all, 2002). Uma nomenclatura referente aos três principais eixos do corpo humano. O eixo longitudinal (crânio/caudal) é designado pela letra Z, o eixo transversal (peito/costas) pela letra X e o eixo lateral (esquerda/direita) pela letra Y (VERNIKOS,1996). Esta nomenclatura foi adotada internacionalmente pela AGARD – *Advisory Group for Aerospace Research and Development* da NATO/OTAN – Organização do Tratado do Atlântico Norte.

Gell considerou como positivos os seguintes movimentos: no sentido de baixo para cima (+Z), da esquerda para direita (+Y) e de trás para frente (+X), segundo a regra da mão esquerda, onde o polegar aponta para cima, o dedo indicador para frente e o dedo médio para a direita. Conseqüentemente, os movimentos contrários nos respectivos eixos são considerados como negativos.

É importante salientar que, de acordo com a primeira lei de Newton, quando um corpo é acelerado em um determinado sentido, sua inércia produz uma pseudo-força no sentido contrário. Por exemplo, quando uma aeronave realiza uma manobra ascendente (movimento considerado positivo), o piloto é forçado contra o assento. De tal maneira, os efeitos fisiológicos são sempre de sentido

oposto ao sentido do movimento que os provoca. Uma aceleração no sentido +Z (de baixo para cima) causa no piloto um deslocamento dos seus fluídos corporais no sentido contrário, de cima para baixo, devido à sua inércia (Força +Gz) (Figura 05).



**Figura 05 – Os sentidos da aceleração realizada são positivos quando: para cima, para direita e frente. As conseqüentes forças inerciais sentidas fisiologicamente são positivas nos sentidos contrários: força Gz+ para baixo, força Gy+ para esquerda e força Gx+ para trás.**

### 1.2.2 Tolerância Humana a Força-G

A tolerância humana aos efeitos fisiológicos conseqüentes da Força-G depende basicamente de quatro fatores relativos à aceleração: sua magnitude, seu tempo de duração, a razão com que é implementada e o eixo do corpo em que a mesma atua. Quanto maior for a magnitude, a duração e a razão com que é implementada a força G, menor será a tolerância, principalmente quando o eixo



exposto à aceleração for o Z, o mais suscetível aos efeitos inerciais de uma aceleração.

A maneira com que estes quatro fatores da aceleração estão inter-relacionados definirá suas conseqüências fisiológicas. Por exemplo, a colisão de um automóvel a 60 km/h contra uma parede, produz uma força de aproximadamente 14G por 125 milésimos de segundo no eixo X. Esta aceleração pode ser bem tolerada pelo corpo humano, desde que o ocupante do veículo esteja com o cinto de segurança. Já uma força de apenas 4G pode ser fatal, caso uma pessoa fique exposta por um período prolongado de tempo no eixo Z.

Outro fator com grande influência na tolerância humana aos efeitos da força G é o próprio estado físico da pessoa. Deve-se evitar as seguintes condições: calor, desidratação, ingestão de álcool e outras drogas, hipotensão, hipoglicemia, hipóxia, hiperventilação, fadiga muscular e doenças. Para um bom desempenho em uma situação de hipergravidade é recomendado que o piloto/tripulante possua um bom condicionamento físico, esteja saudável e bem hidratado, possua valores pressóricos arteriais no limite superior da normalidade e uma pequena distância entre o coração e o cérebro (biótipo brevelíneo).

### **1.2.3 Efeitos Fisiológicos de uma Aceleração +Gz**

No sistema respiratório, o aumento do peso das costelas, do diafragma e dos músculos intercostais, dificulta o processo de respiração e causa fadiga

intensa, embora o mesmo não chegue a ser um fator limitante na tolerância humana a uma aceleração +Gz.

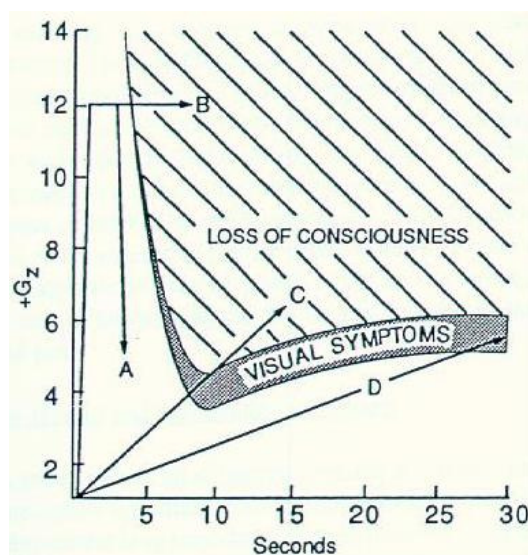
As principais conseqüências fisiológicas desta aceleração é o deslocamento dos fluídos corporais para a parte inferior do corpo, principalmente o “*pooling*” de sangue para as pernas e baixo abdome, reduzindo assim a pressão arterial na cabeça e no tórax. A baixa pressão arterial ocasiona por sua vez uma hipóxia do tipo estagnante, levando à deterioração funcional do sistema nervoso central por baixa perfusão, cujos principais sintomas são a ocorrência dos fenômenos conhecidos como *Gray-out*, *Black-out* e *G-LOC*.

### **1.2.3.1 Grey-out e Black-out**

A exposição à condição de hipergravidade pode levar a deterioração da visão, caso a pressão arterial na retina caia para abaixo da pressão normal, impedindo o correto fluxo sangüíneo.

Exposições a +4Gz podem levar a perda da acuidade visual, diminuição da visão periférica e perda da capacidade de distinguir cores, fenômeno conhecido como *grey-out*, que ocorre quando a pressão arterial do olho cai para cerca de 50 mmHg. Em níveis de aceleração mais altos, ocorre a completa perda da visão, quando a pressão arterial do olho chega em aproximadamente 20 mmHg, igualando-se a pressão intra-ocular. Este fato chama-se *black-out*, e pode ocorrer enquanto a audição e outras atividades mentais continuam normais (Figura 06 D).

Geralmente, os sintomas visuais aparecem antes de qualquer distúrbio de consciência do indivíduo.



**Figura 06 – Sintomas causados pela força G em relação à intensidade e ao tempo de exposição.**<sup>1</sup>

Existe uma grande variação da magnitude da aceleração na qual pode ocorrer a perda de visão periférica, variando de pessoa para pessoa, dependendo da estatura do indivíduo, condição física, nível de iluminação do campo visual, e, em parte, do grau de relaxamento muscular. Em média, a visão periférica é reduzida a um cone de 45° a aproximadamente +4,1Gz, com desvio padrão de

<sup>1</sup> Fonte: NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT. *High G Physiological Protection Training*. Essex: Specialised Printing Services Limited, 1990. p 12.

$\pm 0,7G$ , enquanto que o *black-out* ocorre a  $+4,7Gz$ , com desvio padrão de  $\pm 0,8G$ . Independente disto, a visão não é comprometida nos 5 segundos iniciais de exposição, devido à existência de reservas de oxigênio no sangue presente nos tecidos da retina. Em exposições a acelerações moderadas, a intensidade dos sintomas visuais diminui entre 8 e 12 segundos após o início da exposição à força G, devido a respostas cardiovasculares compensatórias, restabelecendo o fluxo sanguíneo na retina a níveis normais. Este mecanismo de compensação pode permitir que uma pessoa recupere a visão 6 segundos após sofrer um *Black-out*, quando exposta a uma força de  $+5Gz$  (VERNIKOS, J, 1996).

#### **1.2.3.2 PERDA DA CONSCIÊNCIA INDUZIDA**

A exposição a forças  $+Gz$  mais elevadas do que aquelas que produzem *black-out* levam à perda da consciência, devido à perfusão sanguínea insuficiente do sistema nervoso central.

Em acelerações moderadas, por exemplo, de  $+5$  a  $6 Gz$ , o *black-out* precede a perda de consciência (Figura 06 C), porém, a acelerações mais elevadas, a inconsciência pode ocorrer sem que nenhum sintoma visual precedente. (Figura 06 B). Caso o incremento da força G, isto é, a razão com que ela aumenta (G/s), seja muito elevado, o G-LOC ocorre em média de 4s a 6s após o início da exposição. Quando a inconsciência ocorre, perde-se completamente o tônus muscular, e o piloto fica suspenso por apenas pelo cinto de segurança. A recuperação do G-LOC após a normalização da força G é normalmente lenta, possuindo em média 15s de completa incapacitação, seguidos por um período

semelhante de confusão mental até a efetiva recuperação. Devido ao fato de que o G-LOC pode ser sucedido por um breve período de amnésia, ele pode passar despercebido. Alguns estudos mostram que aproximadamente 50% das pessoas que sofrem G-LOC em centrífugas humanas não se lembram do fato (ALONSO & FINNE, 1972).

O principal efeito da aceleração +Gz no sistema cardiovascular é o aumento da frequência cardíaca decorrente a três fatores:

a) o efeito psicológico devido a uma situação anormal (a própria condição de hipergravidade);

b) a sinalização de baixa pressão arterial no pescoço pelos barorreceptores carotídeos ao sistema nervoso simpático;

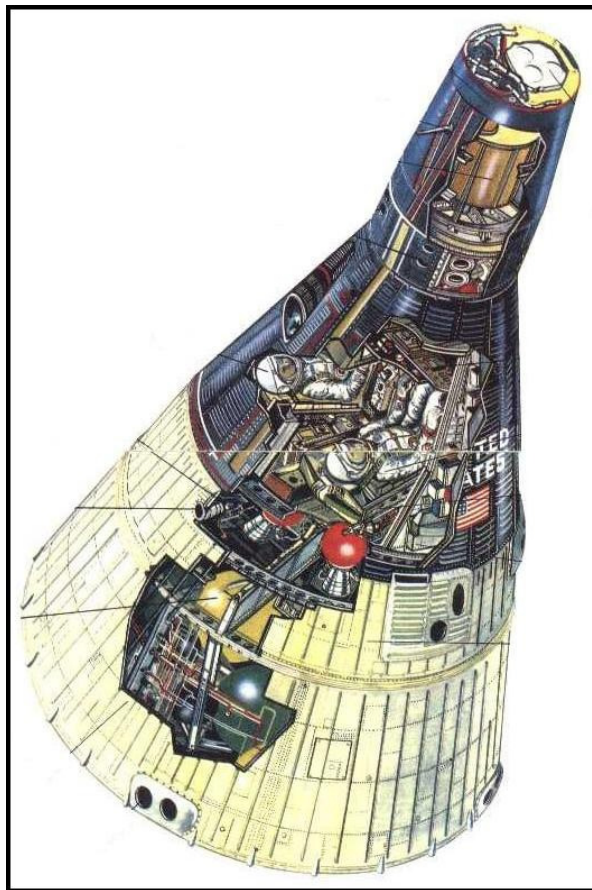
c) e ao grande esforço muscular realizado para respirar.

#### **1.2.4 Efeitos Fisiológicos de uma Aceleração -Gz**

Durante uma aceleração -Gz, o *pooling* de sangue ocorre na direção oposta do +Gz, em direção à cabeça e aos membros superiores, elevando a pressão arterial e reduzindo assim a frequência cardíaca. Ela é menos tolerada do que uma aceleração +Gz devido à falta de mecanismos fisiológicos compensatórios. O nível de tolerância é de aproximadamente 3G por 5 segundos, ocasionando vermelhidão ocular, confusão mental, cefaléia e edema palpebral.

### 1.2.5 Efeitos Fisiológicos de uma Aceleração Gx e Gy

Devido às características da anatomia humana, acelerações nos eixos X e Y não acarretam mudanças fisiológicas significativas, sendo melhor toleradas pelo organismo. A principal consequência de uma elevada aceleração Gx é o aumento do peso do tórax, que dificulta o processo inspiratório. Acelerações do tipo +Gx são encontradas no lançamento de foguetes e ônibus espaciais, onde os astronautas encontram-se sentados dentro da nave com as costas voltadas para o solo (Figura 07).



**Figura 07 – Astronautas acomodados no interior de uma cápsula Gemini.**

*<http://www.nasa.gov>*

### **1.2.6 Métodos de contra-medida aos Efeitos da Força +Gz**

A utilização de métodos de contramedida dentro da ciência aeroespacial é usado principalmente para prevenir ou minimizar os efeitos deletérios da exposição aos efeitos da Força +Gz. Existem muitas maneiras de aumentar a tolerância de uma pessoa aos efeitos da força G. Um fator de grande influência é o próprio estado físico do indivíduo. Deve-se evitar condições de calor, desidratação, ingestão de álcool e de outras drogas, hipoglicemia, hipóxia, hiperventilação, fadiga e doenças, além de manter uma boa condição física e aumentar a tolerância através de manobras musculares, conhecidas como *Anti-G Straining Manoeuvre- AGSM* (GUYTON, 1976).

Essas manobras são derivadas da manobra de Valsalva e basicamente têm por objetivo elevar a pressão arterial na cabeça e no tórax, através da contração da musculatura abdominal.

#### **1.2.6.1 Inclinação do Aumento da Aeronave**

A inclinação do assento da aeronave (*tilt*) tem o objetivo de dividir o vetor na força resultante entre os eixos Z e X, diminuindo as conseqüências fisiológicas negativas de uma exposição a uma elevada aceleração +Gz.

O *tilt* reduz a distância vertical entre o cérebro e o coração, facilitando a manutenção da pressão arterial e a correta perfusão do sistema nervoso central. Estudos sobre a reclinção do assento na direção supina mostram que quanto

maior for o *tilt*, menor serão os efeitos fisiológicos no eixo Z, aumentando assim a tolerância fisiológica no eixo Z e, por conseguinte, a tolerância a esta aceleração, retardando o aparecimento de fenômenos como o *gray-out*, o *black-out* e o G-LOC (GILLINGHAM & PREVIC, 1985).

#### **1.2.6.2 Traje Anti-G**

O traje anti-G é uma calça com cinco bolsas pneumáticas interconectadas: duas em cada perna (uma acima e outra abaixo do joelho) e uma abdominal (Figura 08). Elas inflam-se com ar proveniente da sangria do motor, quando o piloto/tripulante é exposto a uma condição de hipergravidade, pressionando desta forma a musculatura dos membros inferiores e do baixo abdome. O aumento de pressão sobre os músculos produz um deslocamento do sangue venoso em direção ao coração, uma vez que as veias e suas válvulas só permitem o fluxo de sangue neste único sentido. Este processo facilita o retorno do sangue venoso e diminui o volume de sangue retesado na porção inferior do corpo.

Normalmente o traje começa a inflar-se a +2Gz e atinge sua pressão máxima por volta de +7,5Gz, aumentando a tolerância entre +1Gz e +1,5Gz.





**Figura 08 - Traje anti-G Mark 4A.**

<http://www.nasa.gov>

### **1.2.6.3 Positive Pressure Breathing - PBB**

Durante uma elevada aceleração +Z, o aumento do peso corporal dificulta o processo inspiratório, tornando trabalhosa a tarefa de respirar. O PBB é um dispositivo que bombeia oxigênio com pressão positiva para dentro dos pulmões durante uma elevada força G, invertendo assim o ciclo natural da respiração, tornando o processo inspiratório passivo de qualquer esforço muscular, passando a expiração a ser ativa.

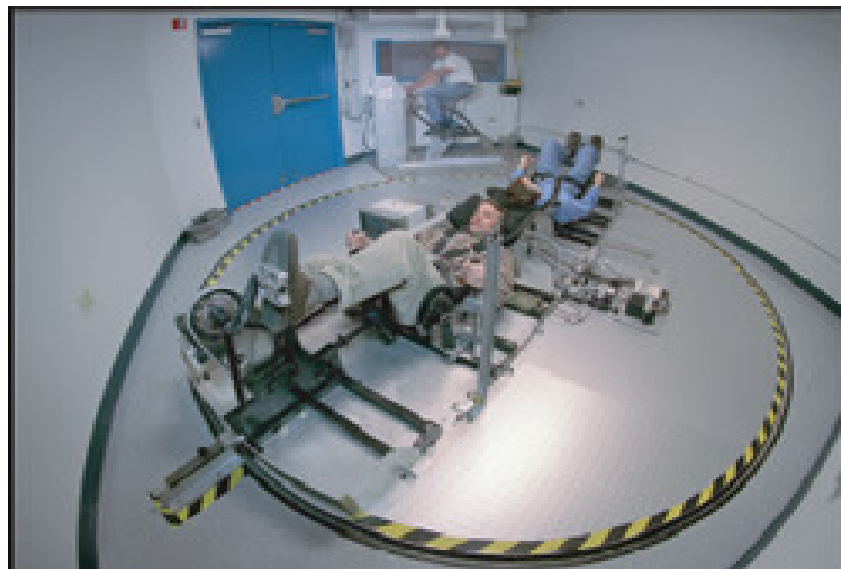
O uso do PBB também eleva a pressão do oxigênio alveolar, facilitando a oxigenação do sangue e pode aumentar a tolerância em até +2Gz. Normalmente, o uso do PBB requer que o piloto/tripulante vista um colete restritor, que impede

que os pulmões sejam “inflados” a um volume que possa gerar algum tipo de dano aos mesmos.

### 1.3 Centrífugas Humanas

Na área biomédica, as centrífugas vêm sendo utilizadas para realizar estudos do comportamento de organismos em hipergravidade. É necessário analisar o sistema vestibular, sistema imunológico, sistema nervoso, sistema digestivo, tecidos ósseo e muscular, aparelho respiratório e principalmente o aparelho cardiovascular (WHITE, 1964).

As centrífugas são consideradas peças primordiais na formação de pilotos militares, astronautas e cosmonautas.



**Figura 09 – Centrífuga Humana Auto Propulsada da Nasa: Um dos métodos de contra-medida aos efeitos descondicionantes da exposição à microgravidade por longos períodos.**

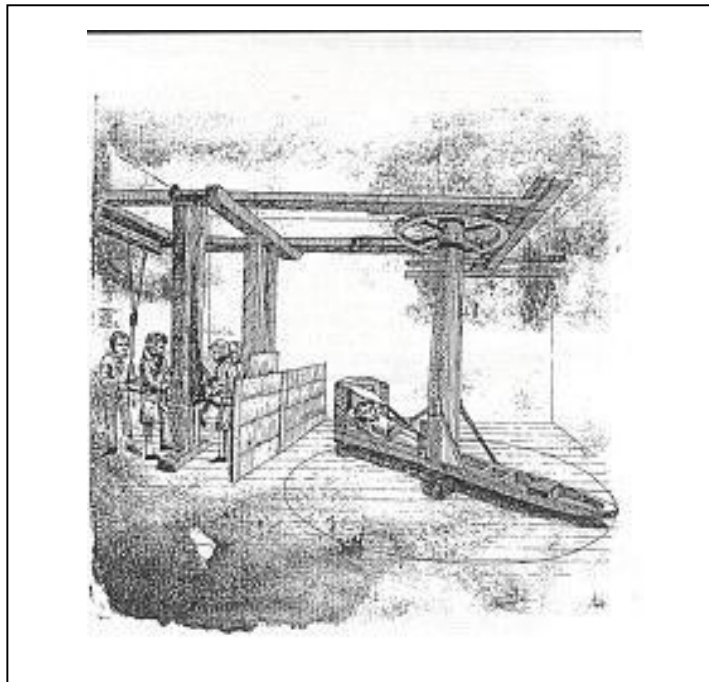
*<http://www.nasa.gov>*

A centrífuga é um instrumento capaz de criar uma aceleração sobre o corpo, através de movimentos circulares em torno de um eixo. Desta maneira, simula-se uma força centrípeta que puxará o corpo em questão para dentro da curva, e uma força de centrífuga, que puxará o corpo para fora da mesma. O equilíbrio destas forças resulta em um movimento circular e uniforme (WHITE, 1964).

As centrífugas são utilizadas para treinar o corpo humano e torná-lo mais resistente à Força G, sendo muito úteis para a simulação do aumento da força gravitacional. Uma centrífuga é um aparelho mecânico constituído de um eixo de rotação, um braço ligado a este eixo e uma gôndola fixada na extremidade do braço. Quanto maior o braço da centrífuga, maior será a Força G atuante na extremidade do braço, onde se encontra a gôndola com um corpo de prova.

Relatos datados de 1795 descrevem o caso de um homem que adormecia após deitar-se em uma grande pedra de moer milho. Enquanto a pedra girava, o homem era “induzido ao sono” e acreditava-se que ele poderia vir a morrer caso o movimento fosse prolongado. Este caso foi relatado por Erasmus Darwin na sua publicação *Zoonomia*, e lá ele especificava que o efeito descrito era induzido pelo movimento centrífugo que fazia com que o sangue acumulasse nos pés e na cabeça.

Entre 1814 e 1818, as centrífugas foram adotadas em La Charité, Berlim, para o tratamento de histeria em pacientes psiquiátricos. Este procedimento foi adotado pelo Dr. Horn (Figura 10).

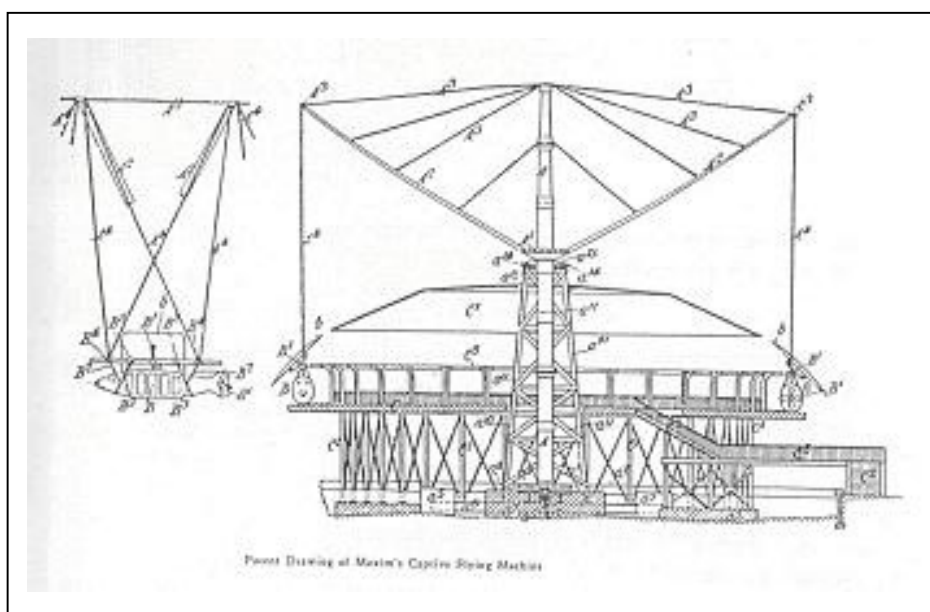


**Figura 10 – Centrifuga usada para tratamento de histeria (WHITE, 1964).**

Em meados de 1850, os fisiologistas já conheciam bem os efeitos superficiais de acelerações em seres humanos. Usando pacientes ou testando em si mesmos, os cientistas puderam observar os efeitos da centrifugação na respiração, na frequência cardíaca e na distribuição do sangue, relacionando-os no estudo da dinâmica cardiopulmonar e no tratamento de desordens circulatórias.

Sir Hiram Maxim, no ano de 1903, experimentou pela primeira vez os fenômenos de “*grayout*” e G-LOC durante testes em uma nova máquina de um parque de diversões (Figura 11). Esta máquina era exatamente como uma centrífuga e estima-se que durante o incidente ele tenha alcançado uma força de +6.87Gz. Ao notar que Sir Maxim estava inconsciente, o operador responsável desligou a máquina. Quando a força resultante caiu para +3Gz, Sir Maxim recobrou a consciência.

E em 1927 houve o primeiro registro de uma internação hospitalar devido a uma “alta exposição” à aceleração. Em um voo de teste o piloto Luke Christopher atingiu  $+10.5 G_z$  em uma manobra a alta velocidade. Durante a internação foi diagnosticado conjuntivite nos dois olhos e pequenas hemorragias em vasos capilares. O piloto Luke Christopher estava novamente apto a voar duas semanas depois e apresentou completa recuperação um mês após o incidente.



**Figura 11 – Esquemático de uma máquina de um parque de diversões.**

<http://www.ipct.pucrs.br/microg>

A força centrífuga é capaz de produzir um aumento da força da gravidade atuante em um corpo de prova que se submete ao experimento. Nos casos de Sir Maxim e do piloto Luke Christopher, eles experimentaram um aumento da força gravitacional no eixo corporal Z (Força  $+G_z$ ), que os levou a um estado de desmaio. Na medida em que esta Força G foi reduzindo e chegando perto da força

que é experimentada diariamente sem se estar em uma centrífuga de prova (Força G igual a 1G), eles recobriram a consciência.

O efeito causado por esta Força G descrita nos indivíduos citados foi a alteração da distribuição sangüínea em seus corpos, causados especificamente pela Força  $G_z$ .

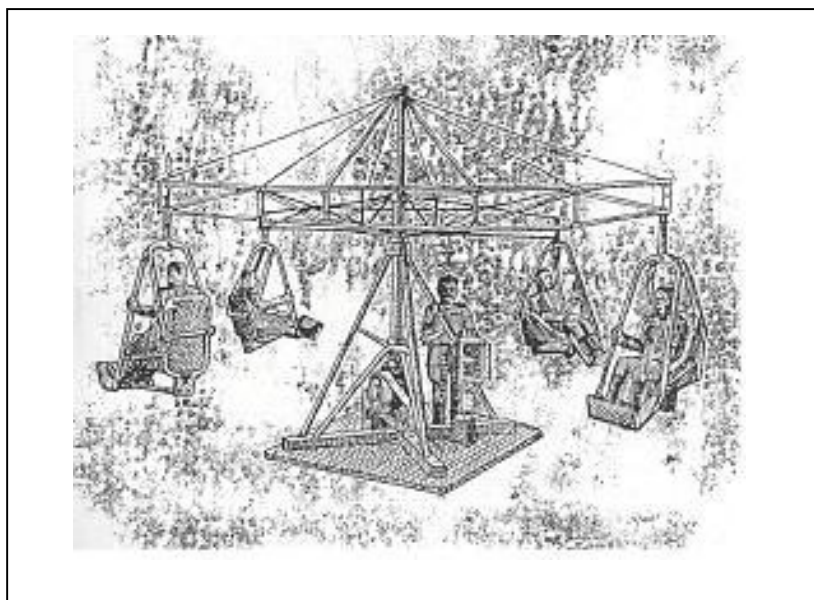
Em 6 de maio de 1935, entrou em operação a primeira centrífuga humana da América do Norte, em Wright Field, Ohio, a qual possuía 20 pés de diâmetro e na extremidade do braço havia um assento que podia ser fixado em qualquer um dos eixos ( $\pm Z$ ,  $\pm X$  ou  $\pm Y$ ). Sua velocidade máxima era de 80 rpm e podia criar uma força de 20G.

No mesmo ano, entrou em operação a centrífuga alemã. Esta foi responsável por todas as pesquisas do ramo aeronáutico na Alemanha, até o final da Segunda Guerra Mundial.

O ano 1938 marcou o registro da construção da primeira centrífuga humana do Japão. Possuía um raio de 23 pés e demorava um minuto para alcançar a velocidade necessária para produzir  $+5G_z$ . Foi raramente usada após um homem ser seriamente ferido ao ser jogado para fora de sua cabine. Neste mesmo ano entrou em operação em Turim, a centrífuga italiana. Com um braço de 10 pés, foi brevemente usada, até ser destruída por um bombardeio aéreo durante a segunda guerra mundial.

Em "*Fundamentals of Aviation Medicine*", publicado em 1939, foi divulgada uma foto de uma centrífuga usada para o treinamento de pilotos. Esta centrífuga

servia para aumentar a resistência do corpo humano perante a Força G (Figura 12).



**Figura 12 – Centrífuga de Teste de Pilotos.**

*<http://www.ipct.pucrs.br/microg>*

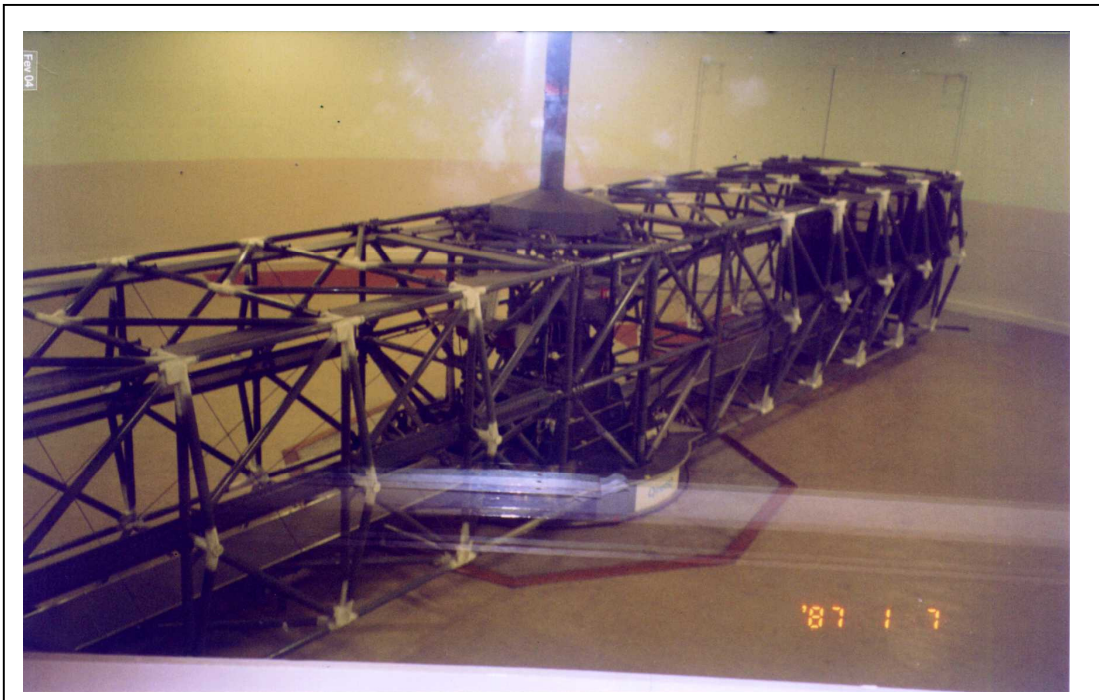
Em 1942, o exército japonês colocou em operação uma nova centrífuga em Tachikawa. No primeiro ano de funcionamento, aproximadamente 3.000 alunos de pilotagem foram testados, numa média de 60 a 100 por dia. Esta centrífuga podia acelerar até  $+15Gz$  com implemento de  $+2G/s$ . No teste padrão, o aluno era exposto a  $+4.5Gz$  por 5 segundos, e aqueles que apresentavam maior tolerância eram selecionados para o treinamento de piloto de caça.

Em 1954, a Inglaterra construiu sua primeira centrífuga humana, no Instituto de Medicina da Aviação em Farnborough, com a supervisão do Dr. W.K. Stewart. A centrífuga, até hoje em funcionamento, possui 2 braços, com 9 metros cada um e cada braço sustenta uma gôndola que podem ser usadas simultaneamente. Esta



centrífuga pode alcançar uma força de 30G, com incremento de  $+7G/s$  (Figura 13 e Figura 14).

A Figura 13 e a Figura 14 são fotos tiradas da centrífuga humana localizada no *Centre For Human Sciences, Royal Air Force*, Farnborough, Inglaterra, Reino Unido. Estas figuras representam a centrífuga e a gôndola, respectivamente, vistas de fora.

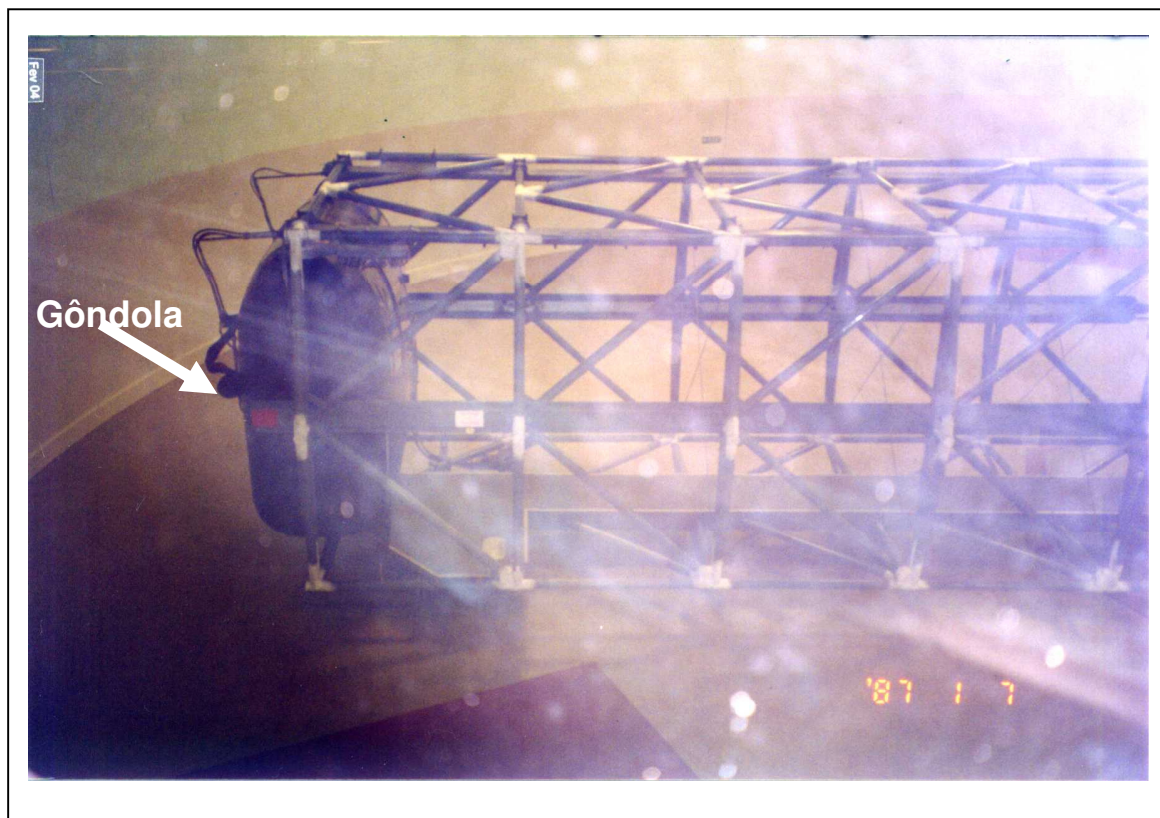


**Figura 13 – Centrífuga humana de Farnborough.**

<http://www.ipct.pucrs.br/microg>

Dentro da gôndola, têm-se todos os aparatos de segurança para garantir a saúde do indivíduo que está se submetendo aos testes. A gôndola ainda poderá conter um pequeno monitor para que o indivíduo acompanhe o que está acontecendo com ele durante o experimento.





**Figura 14– Centrífuga humana de Farnborough, destaque da gôndola.**

*<http://www.ipct.pucrs.br/microg>*

O instituto da aviação em Warsaw foi fundado em 1926, e foi reconhecido como centro de pesquisa e desenvolvimento para organizações governamentais polonesas e a indústria polonesa da aviação. Este instituto executa muitos projetos de pesquisa e trabalhos científicos. A atividade do instituto de aviação é focalizada estritamente na cooperação internacional, na área das esferas aeroespaciais e simuladores de esforço humano de alta tecnologia. Neste instituto está disponível, em um de seus laboratórios, uma centrífuga humana capaz de desempenhar até  $+25 G_z$  e  $2 \text{ } ^\circ G_z$ , com uma aceleração média de 0,1 a  $6 G_z/s$ . A Figura 15 representa uma montagem de fotos da gôndola da centrífuga,

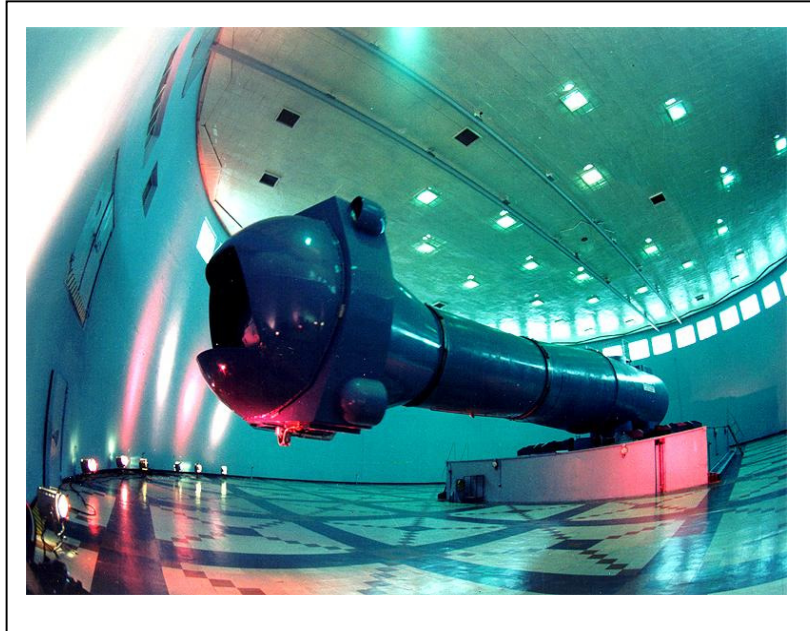
equipamentos de monitoramento e uma visão externa da centrífuga (SCHEDER,2001).



**Figura 15 – Centrífuga da Polonesa**

<http://www.ilot.edu.pl/STRANG/Designs/centri.htm>

Na Figura 16, tem-se o modelo da centrífuga desenvolvida pela Agência Espacial Russa, diferente em estilo da centrífuga da Inglaterra, possui os mesmos objetivos, testar cosmonautas quanto a sua resistência à Força G e validar trajes anti-G para que estes possam aumentar a resistência do ser humano perante a elevada exposição a este tipo de Força. As centrífugas ainda servem para treinar cosmonautas, astronautas e pilotos de aeronaves para resistirem às forças gravitacionais aumentadas.



**Figura 16 – Centrífuga da Agência Espacial Russa**

<http://www.atlasaerospace.net/eng/centr.htm>

Na Espanha há o *Vertífulgo* (Figura 17), como é chamada a centrífuga pelos espanhóis, usado nos testes para simulação de ilusões do sistema vestibular originados nos três sistemas do sentido vestibular. O perfil completo leva entre 20 e 30 minutos e, embora com limitações, o voluntário tem a possibilidade de controlar e de corrigir alguns movimentos do desorientador, como também é chamado este equipamento (SHENDER, 2001 apud ROSA, 2005).



**Figura 17 – Centrífuga Española**

<http://www.semae.org/entrenamiento.htm>

## CAPÍTULO II – METODOLOGIA

Em função do objetivo principal deste estudo estar voltado ao desenvolvimento da estrutura de uma Gôndola para realização de experimentos em uma Centrífuga, não foi proposto à validação do mesmo. Logo, o processo metodológico constituiu em desenvolver e equipar um ambiente para comportar experimentos com animais de pequeno porte, como um roedor, e plantas pequenas, como mudas. Todo o trabalho de pesquisa foi realizado nas dependências do Centro de Microgravidade/FENG da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, sob a coordenação da Prof. Dra. Thais Russomano, PhD.

O Centro de Microgravidade foi estabelecido em 1998 no então Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas da PUCRS, como resultado de um esforço conjunto das Faculdades de Ciências Aeronáuticas, Medicina e Engenharia Elétrica/ Biomédica desta mesma Universidade. Atualmente, o laboratório tornou-se um Centro de Pesquisa, vinculado diretamente à Faculdade de Engenharia da PUCRS.

Representante do Brasil em pesquisas relacionadas à medicina e engenharia aeroespaciais, o Centro de Microgravidade desenvolve pesquisas, principalmente, sob aspectos da fisiologia humana.

Utilizou-se uma área dentro do Centro de Microgravidade para realização dos testes e experimentos com a centrífuga. Esta área contendo um isolamento de

aproximadamente 2 m<sup>2</sup> para evitar acidentes com a centrífuga, e restrita somente durante a realização dos testes e/ou experimentos, sendo desalocada após o término dos testes e/ou experimentos.

## 2.1 INSTRUMENTOS UTILIZADOS

### 2.1.1 - Equipamentos

- 1 centrífuga pequena para realização dos testes iniciais de aquisição de sinais;
- 1 computador para coleta de dados modelo ZD7140Us da *HEWLETT-PACKARD*, processador P4 3.0 GHz HT 512 MB RAM;
- 1 dispositivo de transmissão de sinais de áudio e *Vídeo Link*;
- 1 dispositivo de captura de vídeo *Dazzle 90*;
- 1 acelerômetro;
- 1 circuito de transmissão de dados via frequência de rádio;
- Eletrodos de superfície para captação de derivações da ECG;
- 1 circuito de amplificação dos sinais dos eletrodos;
- 1 circuito de recepção de dados enviados em frequência de rádio, com conexão via porta serial;
- Software de programação em linguagem Pascal/Dephi versão 7.0;

- Software para microcomputador programação da ROM do circuito de comunicação via rádio para configuração do protocolo de envio de dados;
- 1 dispositivo VHS;
- Sensores de temperatura;
- Sensores umidade;
- Sensores pressão;
- Cilindro de acrílico com fechado na base com tampa superior removível para fixação do corpo de prova;
- Chapas de acrílico para construção da cúpula externa;
- Cabos elétricos e materiais isolantes.

### **2.1.2 - Centrífuga de Pequeno Porte e demais Dispositivos**

Utilizando o Protótipo II da centrífuga, desenvolvido no Centro de Microgravidade / FENG (COELHO, 2005), foi criada uma interface baseada em um sistema micro-controlado para aquisição, conversão e transmissão de sinais vindos de um sensor de aceleração instalado na centrífuga. O sinal do acelerômetro é transmitido através de um enlace de rádio por componentes eletrônicos fixados na centrífuga e captado por um receptor de ondas de rádio, conectado na porta serial de um micro computador que faz a aquisição do sinal.

O Protótipo II da centrífuga, visto na Figura 18, foi desenvolvido como dissertação de Mestrado por Rodrigo Pessano Coelho, 2005 e possibilita o acoplamento de instrumentos para a coleta de dados e a utilização de alguns corpos de prova. Além de ser capaz de desempenhar velocidades de rotação mais elevadas do que o protótipo anterior, expondo o corpo de prova a Forças G mais elevadas.

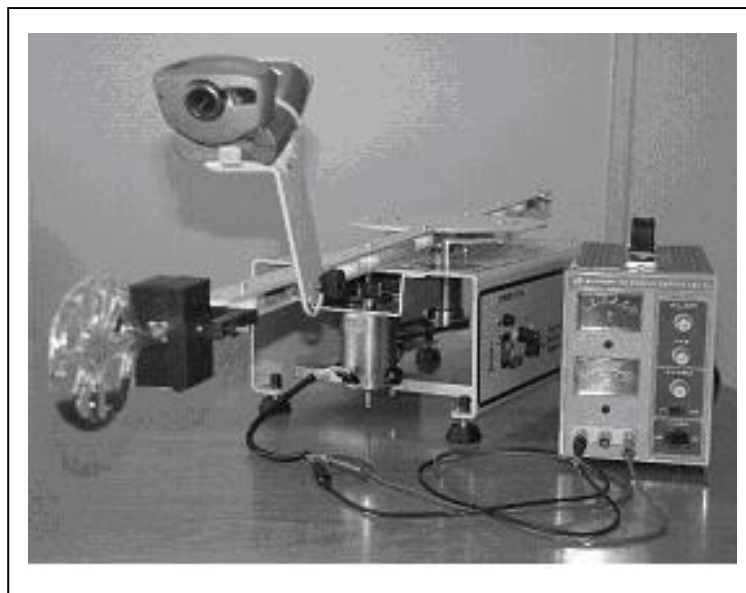


**Figura 18 – Centrífuga de pequeno porte.**

A Figura 19 ilustra o Protótipo-II da Centrífuga vista de frente, com alguns instrumentos instalados. Nesta montagem, tem-se um corpo de prova para visualização do deslocamento do fluido conforme o aparato se move e uma câmera que grava o que está ocorrendo com o corpo de prova durante o

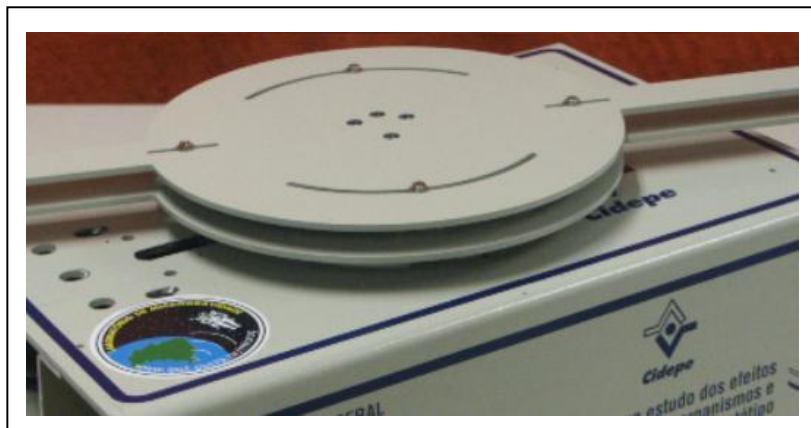


experimento. Após o experimento encerrar, as imagens são passadas da memória da câmera para um microcomputador.



**Figura 19 - Centrífuga de pequeno porte vista de frente.**

Constituído de uma base de aço, o Protótipo II da centrífuga possui um motor de corrente contínua de 12 V, que pode atingir até 2250 rpm; um sistema de redução que, através de três eixos, transmite a rotação do motor para o braço da centrífuga; um braço de 1200 mm (raio de 600 mm) com a porção central em forma de disco, medindo 200 mm de diâmetro (Figura 20). A parte inferior do braço é acoplada a uma peça circular, que por sua vez está acoplada ao terceiro eixo do sistema de redução do motor.



**Figura 20 – Peça central do braço da Centrífuga**

A parte central do braço da centrífuga, disposta no formato de um círculo, é um excelente local para fixação de dispositivos, tanto é que nele foram fixados os dispositivos de transmissão de áudio e vídeo via frequência VHF e os módulos de conversão de sinais e envio dos dados dos sensores via enlace de rádio.

O software desenvolvido (ROSA, 2005), com o auxílio de uma placa de vídeo capaz de processar sinais enviados em frequência de televisão, faz a sobreposição dos valores calculados com a imagem do corpo de prova. Assim, na tela tem-se a imagem do corpo de prova, o som captado pela câmera, e os demais sensores disponíveis.

Este software desenvolvido em 2005 sofreu modificação para comportar mais sensores e para trabalhar com outro dispositivo de captura de vídeo.

Para captação dos sinais de vídeo e áudio do corpo de prova durante o experimento, utilizou-se uma câmera sensível ao espectro infravermelho

(Figura 21). Esta câmera possui um microfone embutido, diminuindo o número de sensores necessários para a realização do experimento.



**Figura 21 – Câmera sensível ao espectro infravermelho.**

Os sinais de áudio e vídeo captados pela câmera, transmitidos por um dispositivo que, conectado à câmera, envia-os por onda de TV na frequência VHF correspondente ao canal oito (Figura 22). A função do *Vídeo Link*, visível na Figura 22, é receber o áudio e as imagens da câmera e transmiti-las em frequência VHF, para serem captadas pelo dispositivo VHS.



**Figura 22 – VídeoLink.**

Na Figura 23 está o Dazzle 90, do dispositivo utilizado para captação do sinal do áudio e do vídeo, transmitidos pelo *Vídeo Link* e recebidos pelo dispositivo VHS, disponibilizando destes na forma de um dispositivo de vídeo do Windows. Ele é conectado ao microcomputador através de uma interface USB.



**Figura 23 – Dazzle 90, dispositivo de captura de vídeo**

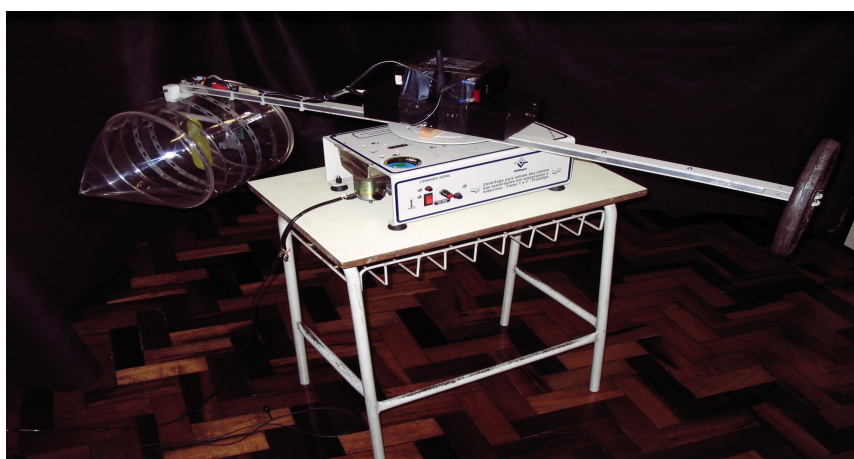
Este dispositivo elimina a necessidade de uma placa de captura de vídeo instalada no microcomputador utilizado na dissertação anterior. (ROSA, 2005)

Para que a centrífuga de pequeno porte se movimente é necessária a utilização de uma fonte de energia de corrente contínua. A fonte de alimentação utilizada para isto foi uma fonte da marca Amerl, modelo LPS-305S (Figura 24). E a velocidade da centrífuga é controlada pela regulação de tensão desta fonte.



**Figura 24 – A fonte de alimentação utilizada para isto foi uma fonte da marca Amerl, modelo LPS-305S**

Na Figura 25 está disposta a centrífuga de pequeno porte com sua estrutura, gôndola, contra-peso, braços e corpo da centrífuga, disco central dos braços, a caixa de proteção e isolamento dos circuitos, a bateria de alimentação fixada sobre a caixa de proteção e os cabos de ligação entre os dispositivos internos à caixa de proteção e os sensores instalados na gôndola.



**Figura 25 - centrífuga de pequeno porte com todos os sensores e equipamentos.**



## 2.2 MODIFICAÇÕES E CONFEÇÃO DE EQUIPAMENTOS

### 2.2.1 Adaptação do Braço da Centrífuga

O braço constituído de uma base de aço, o Protótipo II da centrífuga possui um motor de corrente contínua de 12 V, que pode atingir até 90 rpm; um sistema de redução que, através de três eixos, transmite a rotação do motor para o braço da centrífuga; um braço de 1200 mm (raio de 600 mm) com a porção central em forma de disco, medindo 200 mm de diâmetro (Figura 26). O máximo de rotação atingida é de 92 rpm, e sem a gôndola.

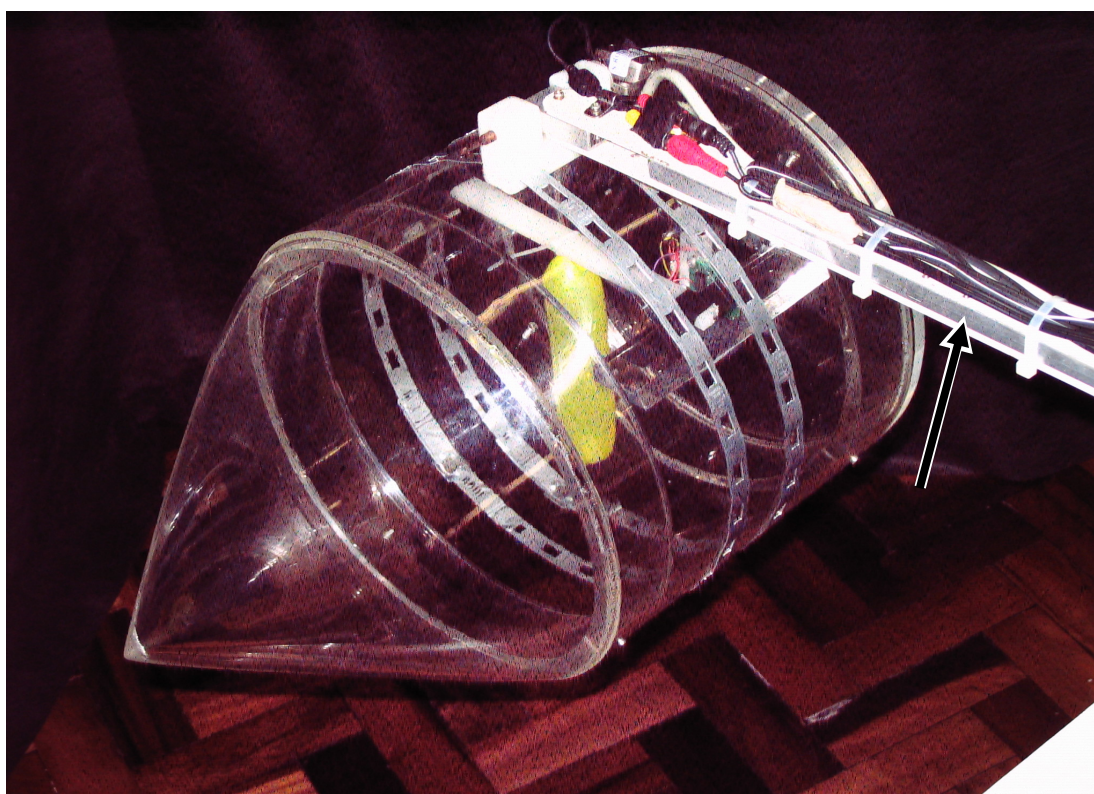
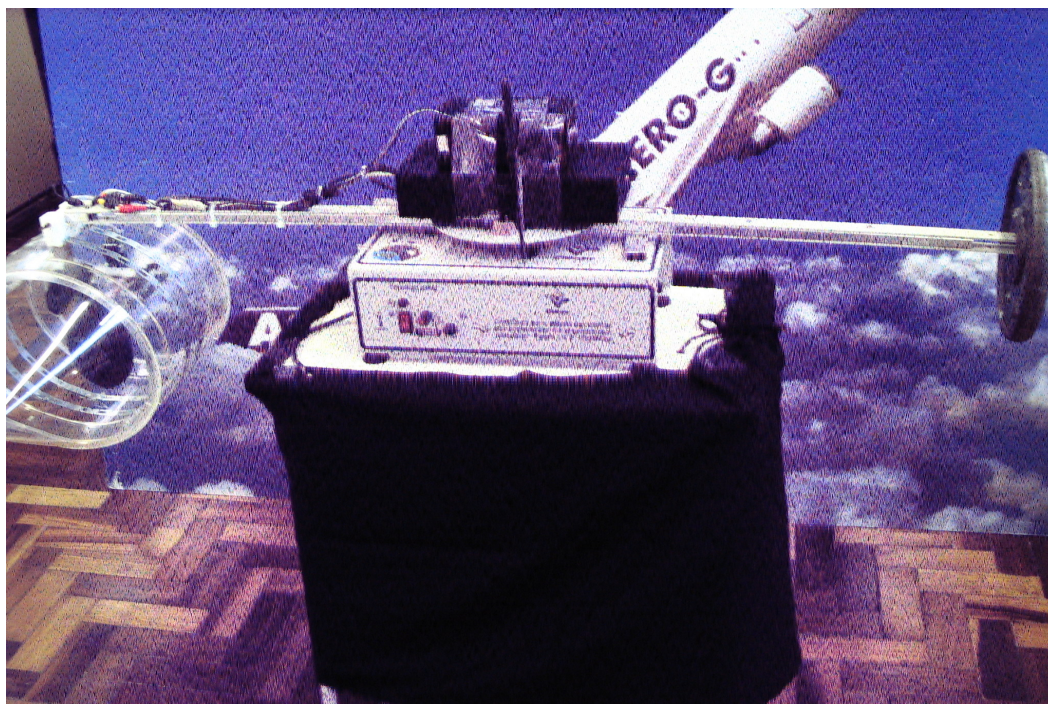


Figura 26 – Braço da centrífuga, com a gôndola na extremidade do braço, já com reforço.

O braço apresenta um reforço interno, apontado na Figura 26, ao qual as porções superior e inferior são afixadas para proporcionar maior rigidez mecânica. Feito em um perfil de alumínio de 20 mm x 12 mm e parede de 1.5 mm, colocou-se este reforço por toda sua extensão. A parte inferior do braço é acoplada a um mancal rolamentado peça circular, que por sua vez está acoplado ao terceiro eixo do sistema de redução do motor.

Na Figura 27 está uma visão total da centrífuga, contendo a gôndola, o contra peso, o braço da centrífuga e a caixa proteção dos dispositivos fixados no centro de rotação da centrífuga.



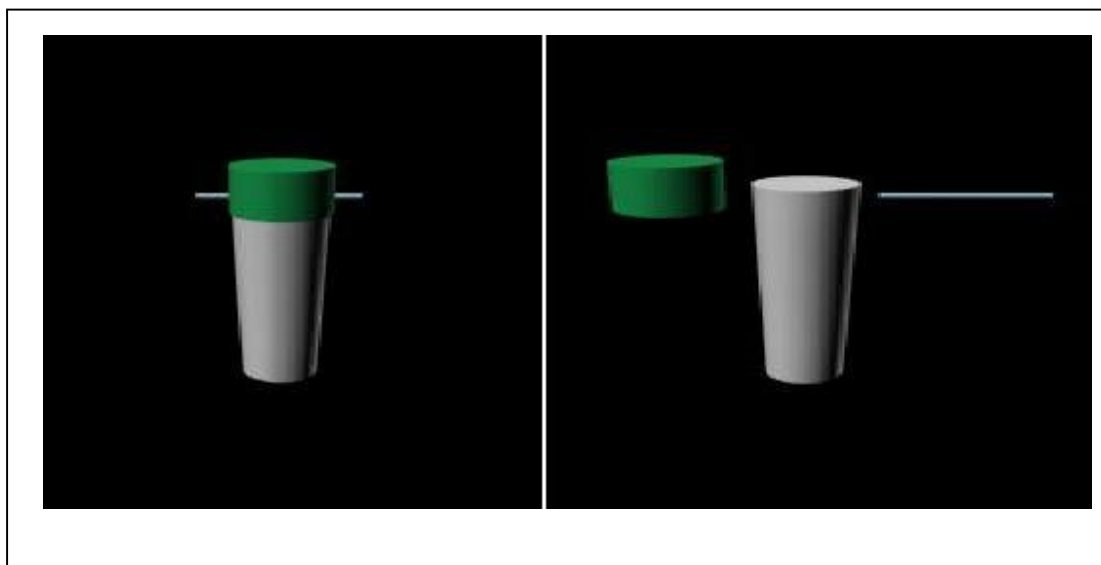
**Figura 27 – Centrífuga de pequeno porte com o contra peso e a gôndola.**



### 2.2.2 Protótipo I da Gôndola

A gôndola é composta basicamente por duas partes, uma parte móvel interna, que comportará o corpo de prova, e uma cúpula que isola o corpo de prova do ambiente externo.

O suporte do corpo (Figura 28) de prova deve prover uma maior imobilização na base para que este fique em posição ereta, e na parte superior um pouco mais alargada para que o corpo de prova tenha uma maior mobilidade.



**Figura 28 – Suporte do Corpo de Prova**

A Figura 28 mostra uma representação do suporte do corpo de prova, onde há uma tampa (cilindro menor), um receptáculo onde fica o corpo de prova (cilindro maior) e um pino que atravessa a tampa e o receptáculo o qual o fixa na estrutura da gôndola junto ao braço da centrífuga. A tampa possui orifícios por onde passam os fios dos eletrodos de superfície para monitoramento de frequência cardíaca, bem como aberturas para troca de gases com a cúpula.

Na esquerda da Figura 28 o suporte encontra-se montado como se estivesse fixado dentro da cúpula, pronto para iniciar o experimento. No lado direito o suporte do corpo de prova está desmontado com todas as partes móveis separadas.

Descrição dos componentes do suporte:

Cilindro: Circunferência Base – 11,9 cm

Circunferência Topo – 13,8 cm

Comprimento – 10,3 cm

Espessura – 1,8 mm

Peso ~ 60 g

Material – Acrílico Transparente

Tampa: Comprimento - 2,5 cm

Circunferência - 14,6 cm

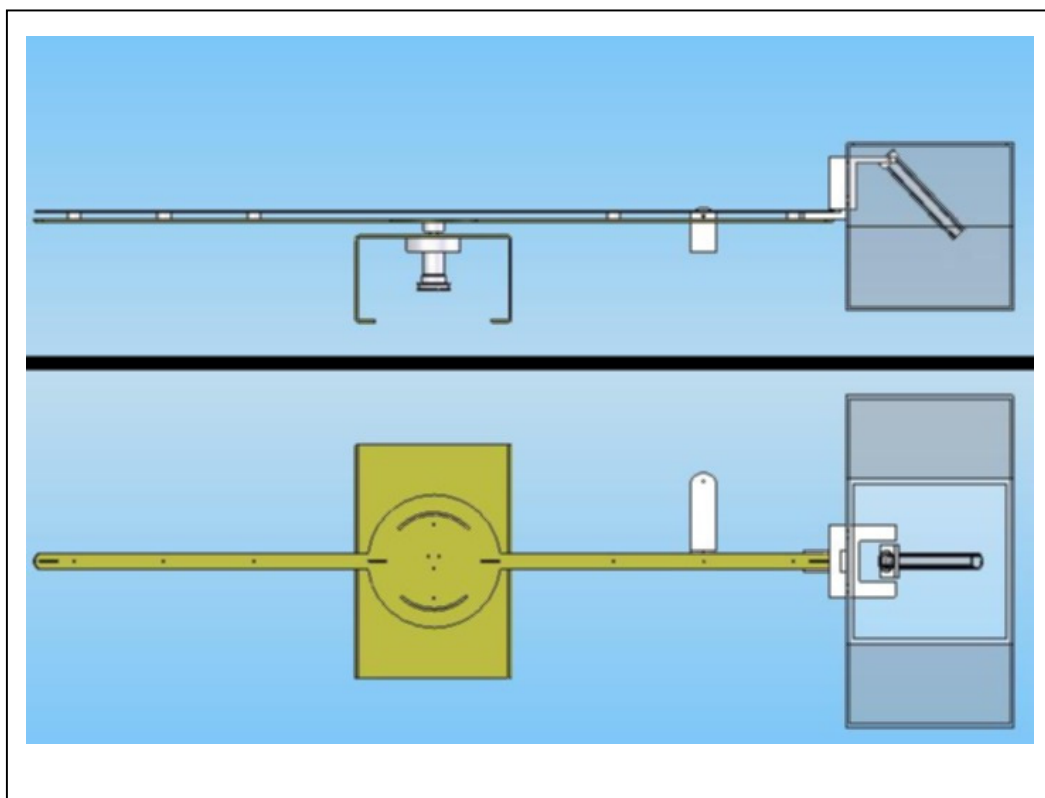
Espessura – 1,5 mm

Peso ~ 10g

Material – Plástico Fosco

Na Figura 29, há a representação do complexo da gôndola, o cilindro de inserção do corpo de prova e a cúpula acrílica, fixados junto ao braço da

centrífuga. No topo há uma visão lateral, na parte inferior há a representação da mesma na vista de cima. A direita encontra-se a gôndola, composta pela cúpula e o cilindro, fixada no braço da centrífuga. Ainda no braço da centrífuga, há o suporte da câmera, e no centro a base retangular com o motor.



**Figura 29 – Desenho da gôndola fixada na centrífuga.**

A cúpula, parte externa da gôndola, possui oito faces translúcidas compostas de acrílico. A face de cima será removível possibilitando a inserção do suporte do corpo de prova dentro da cúpula.

A face adjacente ao topo em ângulo de  $90^\circ$  foi fixada no braço da centrífuga e foi inserido um mecanismo para fixação do suporte do corpo de prova. Esta face

também possui orifícios vedados por onde fios com os sinais dos sensores atravessaram a cúpula e chegam até o centro de rotação da centrífuga, onde estão os equipamentos eletrônicos mais volumosos.

Os sensores de umidade, temperatura e pressão ficam fixados em um suporte interno da gôndola.

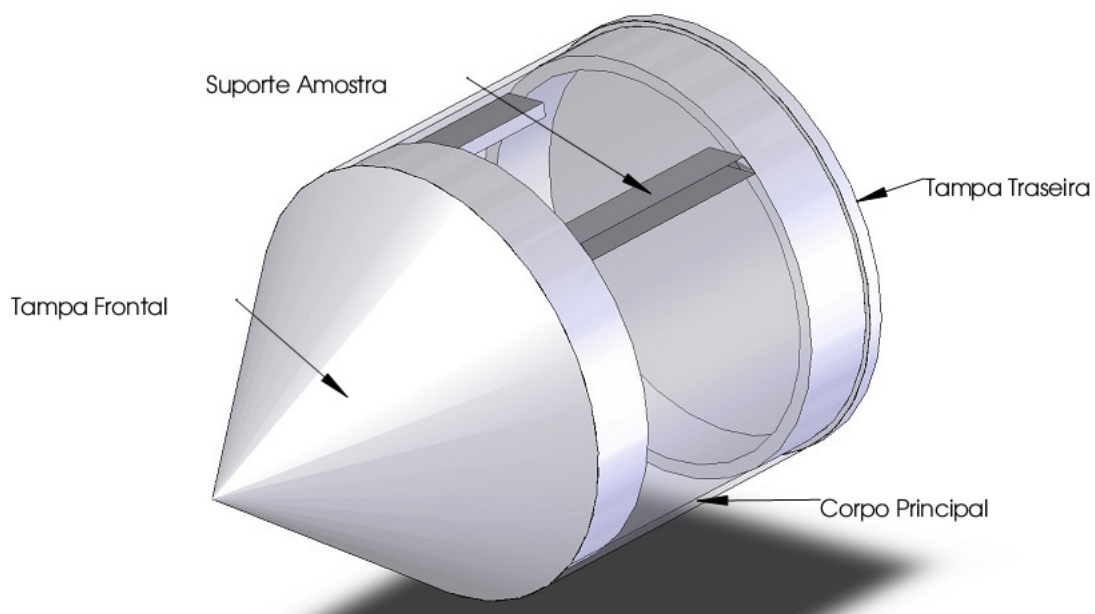
### **2.2.3 Protótipo II da Gôndola**

Foi utilizado material PVC para simular o tamanho ao qual ficaria mais adequado para suportar um corpo de um animal de pequeno porte em seu interior.



**Figura 30 – Protótipo II da gôndola em material PVC.**

Com o segundo protótipo Figura 30, realizou-se ensaios e a necessidade de melhorias, demonstradas na Figura 31. Projetou-se o formato da gôndola de forma a facilitar o acesso ao corpo de prova e os sensores, durante a manutenção e ensaios de testes, a tampa traseira removível, a tampa frontal mais afunilada para vencer a resistência do ar e um suporte para fixar o suporte do corpo de prova, de maneira fácil.



**Figura 31 – Desenho da versão final da gôndola.**

A Figura 32 descreve a gôndola e suas dimensões, servindo como base para a construção da gôndola, para melhor visualização do corpo de prova o material empregado em acrílico, optou-se pelo formato em cone para vencer melhor a resistência do ar, este foi confeccionado na empresa Acrelin e a pouca mabilidade do acrílico limitou fazê-lo mais afunilado, demonstrado na Figura 33.

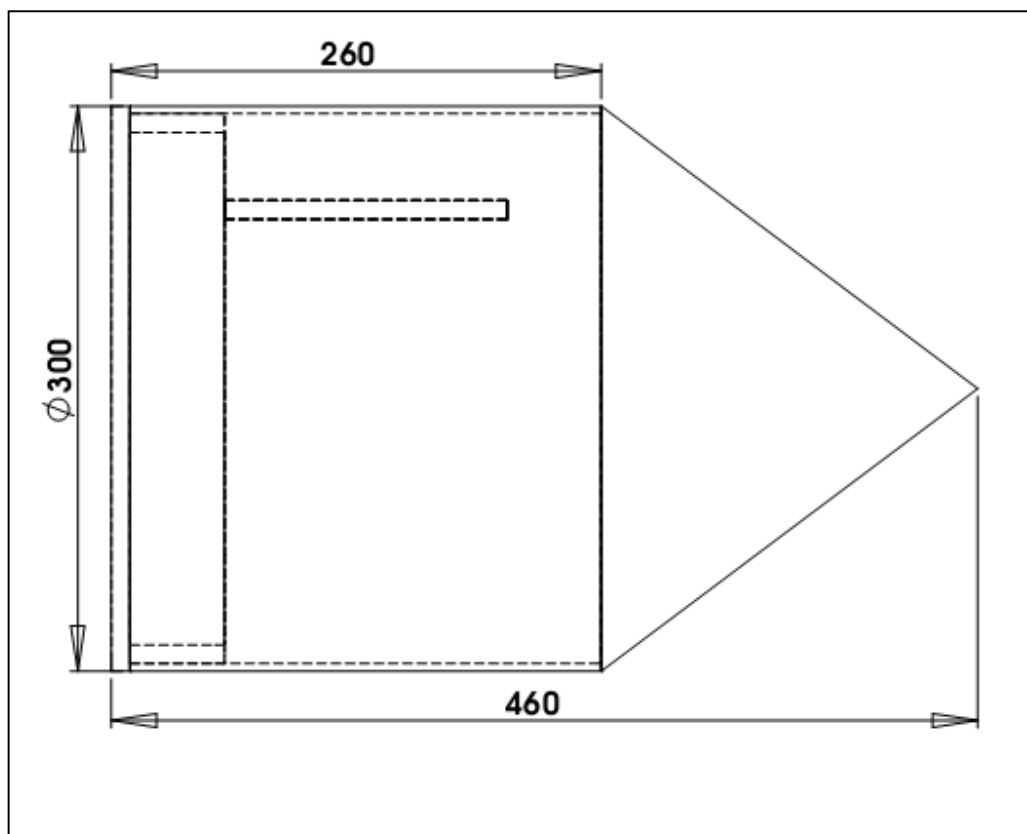


Figura 32 - Croqui da gôndola, dimensões em milímetros.

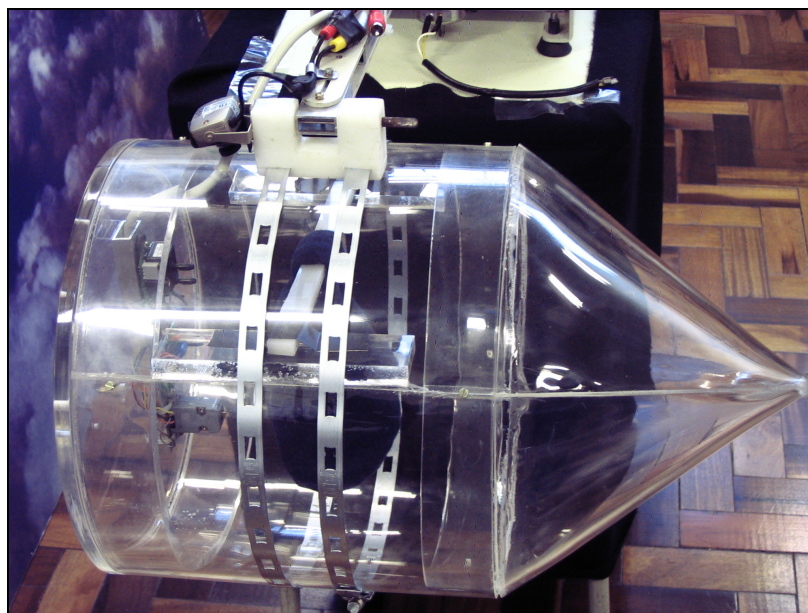


Figura 33 – A gôndola vista lateralmente.

### 2.2.4 Instrumentação do protótipo II

A gôndola, em seu interior era composta de sensores (pressão, temperatura, umidade), para monitoramento do ambiente, entre a cúpula e o suporte do corpo de prova. Na Figura 34, a localização está indicada pela seta, junto a tampa traseira da gôndola.

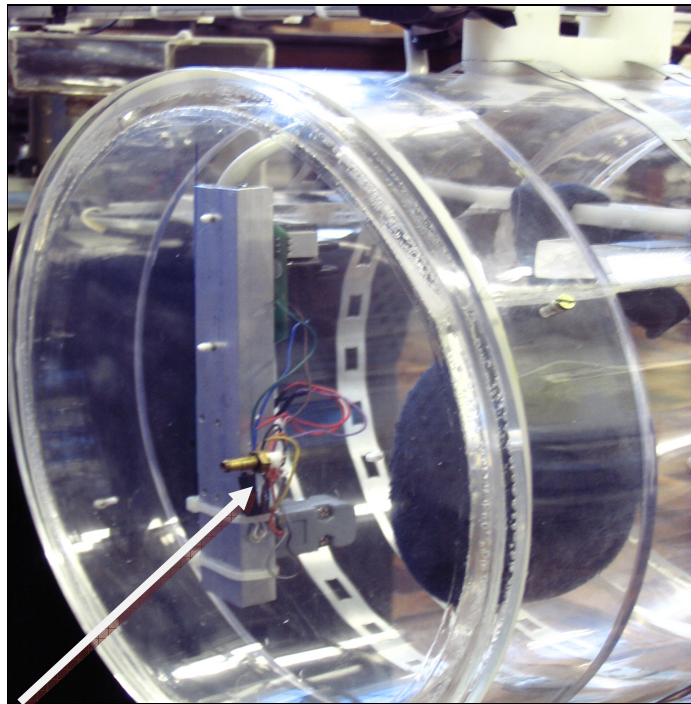


Figura 34 – Imagem dos sensores acoplados junto à gôndola.



### 2.2.4.1 Sensor de Pressão Atmosférica

Ainda na cúpula fica acoplado um sensor de pressão atmosférica, sensor este demonstrado na Figura 35, responsável por monitorar esta grandeza no interior da gôndola em relação ao meio externo.



**Figura 35 - Sensor de Pressão Atmosférica.**

O sensor de pressão atmosférica (barômetro) é do modelo 144SC0811BARO da *Sensor Technics*.

#### Descrição do sensor:

Faixa de medição: 800mbar a 1100mbar

Sinal de saída: 0V a 5V



Na Figura 36, estão as fotos tiradas no túnel de vento, localizado no centro de Energia Eólica – CE-EÓLICA/PUCRS, onde foram realizados testes aerodinâmicos para validação do formato da gôndola e calibração do sensor de pressão atmosférica do interior da gôndola.

O túnel de vento ou túnel aerodinâmico é um aparelho que testa a ação do ar sobre um objeto. O vento deste túnel tem diferentes velocidades. Controlam-se também temperatura e pressão do ar.

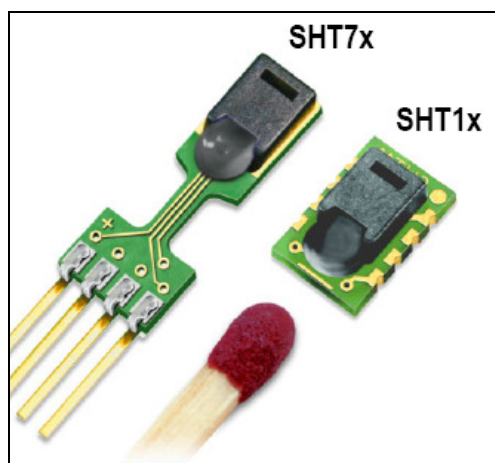
A centrífuga de pequeno porte foi colocada no interior do túnel de vento para testar a aerodinâmica da gôndola, a qual teve limitação em seu designer devido ao acrílico ter uma limitação em seu manuseio, esta estava fixada na extremidade do braço da centrífuga. Testou-se a estabilidade e o controle da gôndola, como se estivesse girando livremente e foram lançadas rajadas de vento sobre a centrífuga mais especificamente à gôndola.



**Figura 36 - Imagens da gôndola sendo testada no túnel de vento.**

### 2.2.4.2 Sensor Temperatura e Umidade

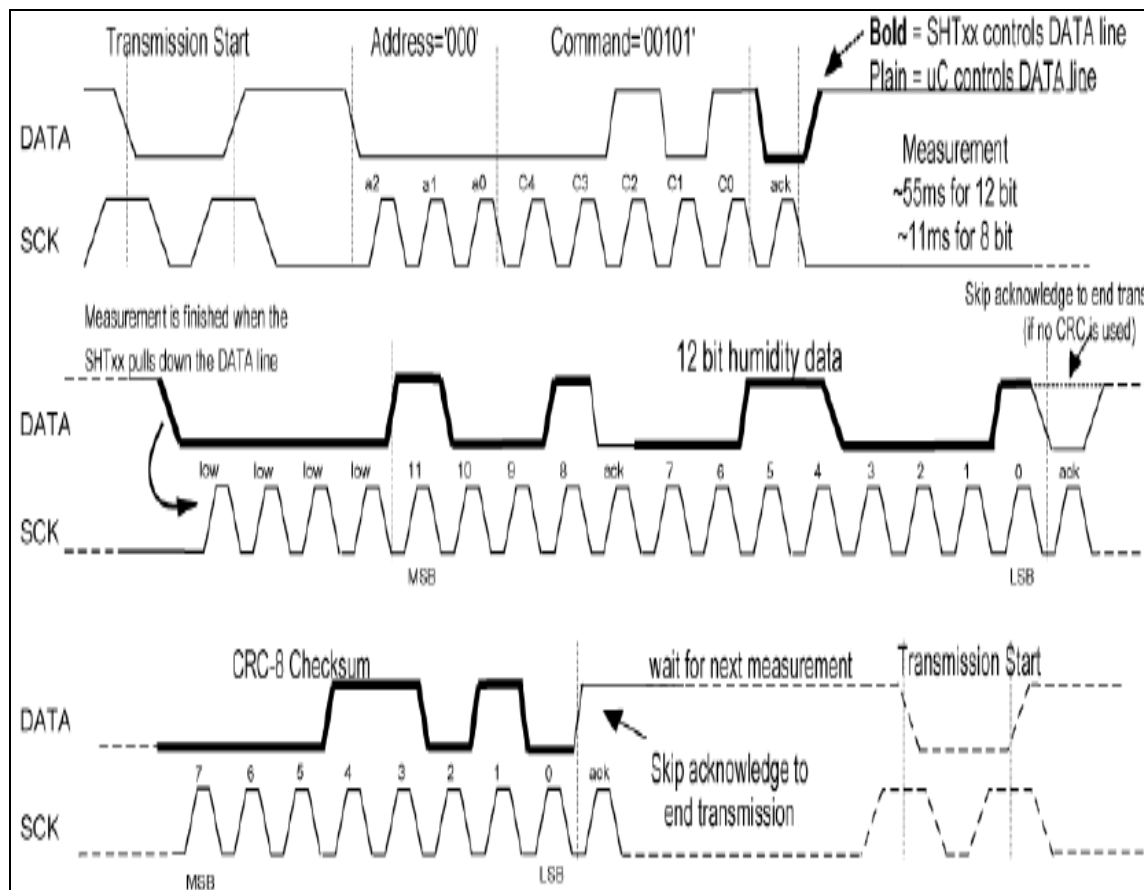
Para a monitoração dos vários fatores aos a centrífuga está sujeita alguns sensores foram colocados neste projeto, como o de temperatura e de umidade, mostrados na Figura 37. A centrífuga opera em temperatura ambiente, porém os sensores são colocados dentro da gôndola, que possui isolamento do exterior, e para manter registros destes parâmetros de ambiente interno à gôndola, que são muito importantes para a realização dos testes, escolheu-se o sensor de temperatura e umidade da *Sensirion* modelo SHT71 (TAVARES, 2003).



**Figura 37 – Sensor de temperatura e umidade SHT71.**

O SHT71 possui comunicação digital, evitando assim que seu sinal sofra interferência das variáveis de ambiente durante o envio das leituras. Ele também apresenta resoluções de 14bits para temperatura e 12bits para umidade, caracterizando-se num sensor de boa resolução, e apropriado para experimentos

biomédicos. A comunicação é feita através de um protocolo próprio que segue o diagrama temporal a seguir.



**Figura 38 – Diagrama Temporal do protocolo de comunicação do SHT71.**

No diagrama apresentado na Figura 38, tem-se um exemplo de um procedimento completo de requisição e leitura do valor de umidade relativa. O protocolo é composto por sete fases, são elas: Início de transmissão, envio do endereço e comando, recebimento do sinal de *acknowledge*, espera da conversão, recebimento dos 4 bits mais significativos, envio de um sinal de

*acknowledge* e recebimento dos 8 bits menos significativos; como não se usa a informação de CRC, não se envia outro sinal de *acknowledge*.

#### **2.2.4.3 Transceiver de Rádio Frequência**

O sistema de comunicação remota foi idealizado fazendo-se uso do *transceiver* de rádio frequência da *Wenshing* modelo TRW24G.

Este produto apresenta baixo custo, operação simplificada e bom alcance, justificando seu uso neste projeto.

O TRW24G baseia-se no circuito integrado da *Nordic* nRF2401, porém, já vem num circuito completo, disponibilizando apenas as entradas e saídas para operação. A *Wenshing* optou por um cristal de 16 MHz sendo a única variável não configurável do *transceiver*.

Outras características do transceiver são:

- Taxas de transmissão de até 1Mbps;
- Operação Multicanal;
- 125 canais;
- Endereços de até 40bits;
- Possibilidade da presença de *Cyclic Redundancy Check* (CRC);
- Recepção simultânea em dois canais;
- Operação a partir de 2,4 GHz;

- Alcance de até 280m.

Segue na Figura 39 o diagrama de blocos do nRF2401, fornecido pelo fabricante e na Figura 40 o *transceiver* produzido pela *Wenshing*.

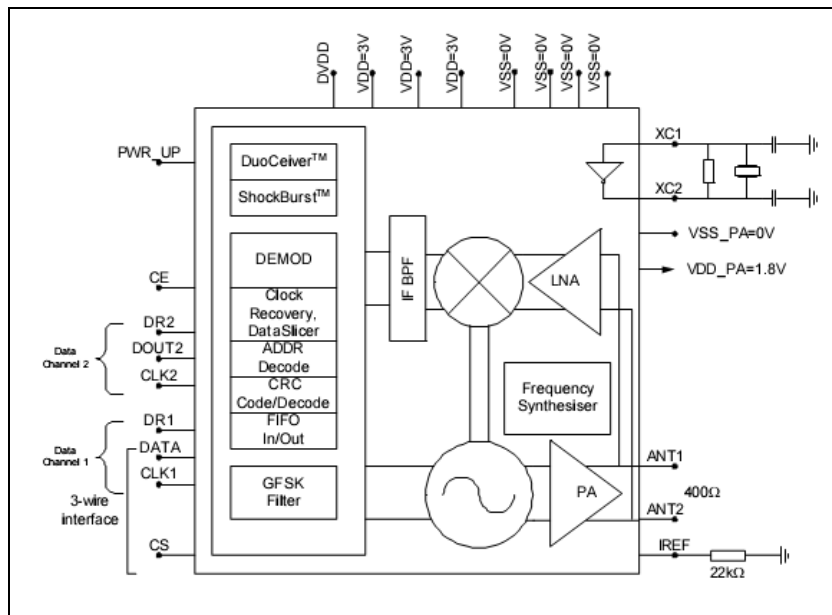


Figura 39 – Diagrama de Blocos do nRF2401.

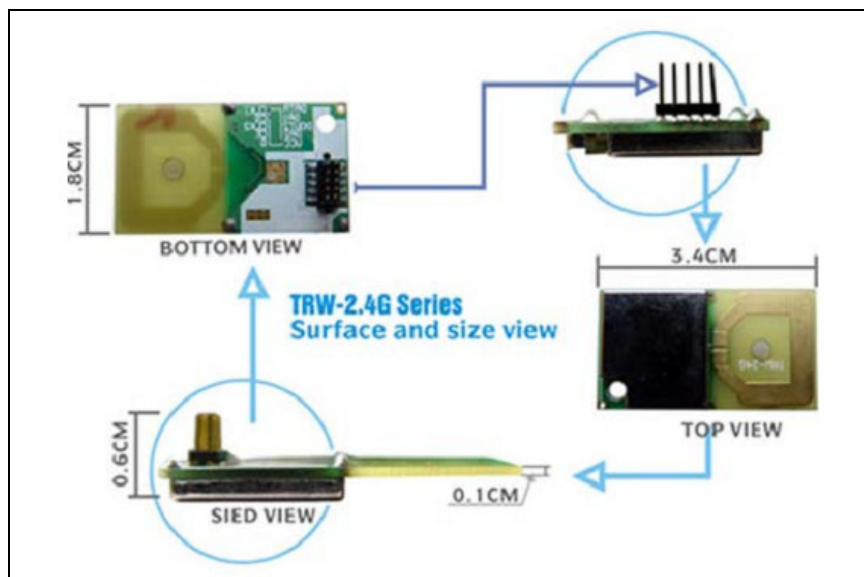
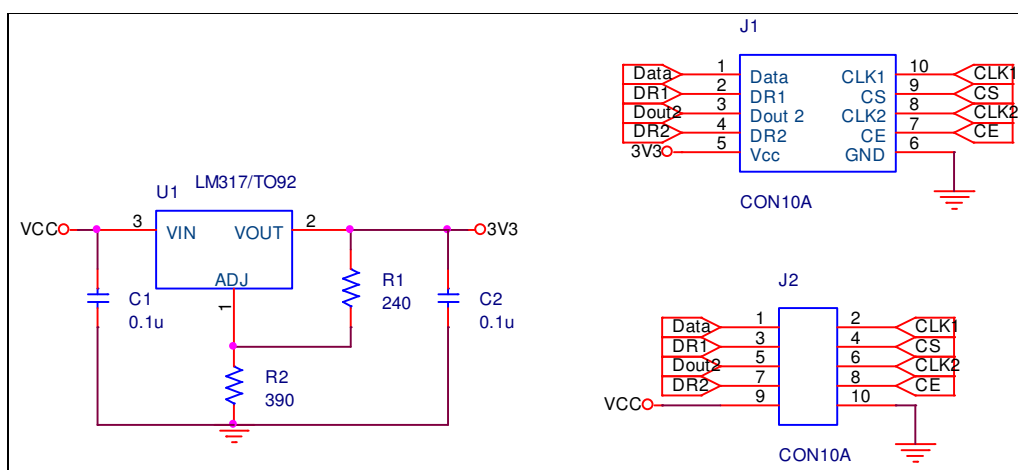
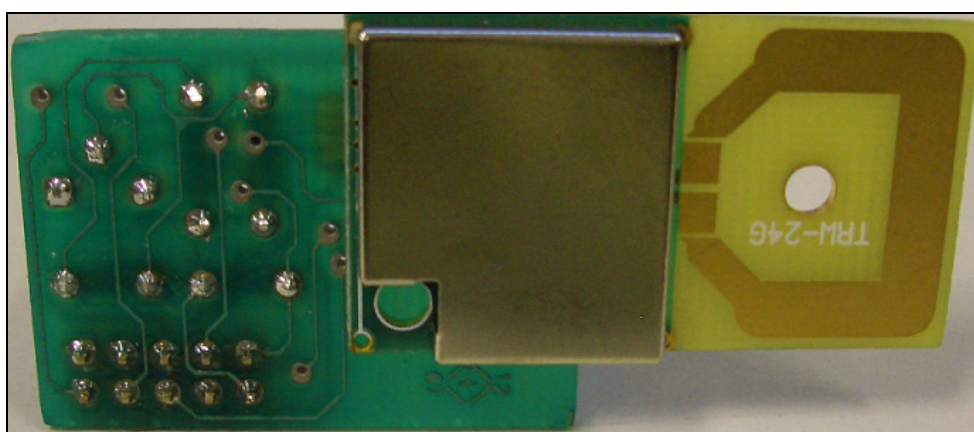


Figura 40 – Vistas do *transceiver* TRW24G.

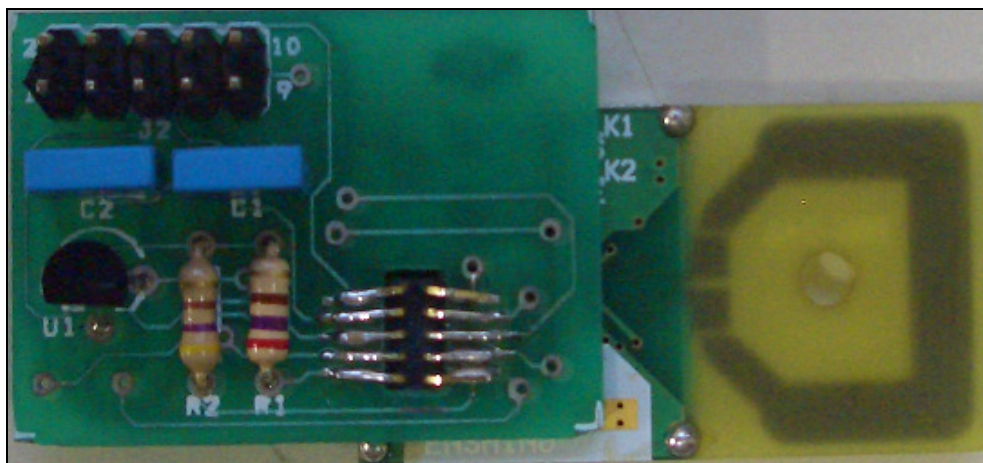
O projeto eletrônico da gôndola da centrífuga foi pensado de forma modular, assim utilizou-se o esquema mostrado na Figura 41 como um adaptador do *transceiver* para a placa controladora. A montagem final pode ser vista nas Figuras 42a e Figura 42b.



**Figura 40 - Esquema elétrico do adaptador para o TRW24G.**



**Figura 42a – Montagem final do adaptador do transceiver: vista 1.**



**Figura 42b – Montagem final do adaptador do transceiver: vista 2.**

#### **2.2.4.4 Acelerômetro MMA3202D**

Para o monitoramento da aceleração criada durante os experimentos com a centrífuga, foi utilizado um acelerômetro modelo MMA3202 da *Freescale*. Este componente apresenta um sinal analógico proporcional à aceleração que está submetido. Este tem a capacidade de medir de -50G a +50G. Sua resolução é de 40mV/G e o sinal de tensão para 0G é de 2,5V. O circuito mostrado na Figura 43 foi projetado segundo as especificações do fabricante.



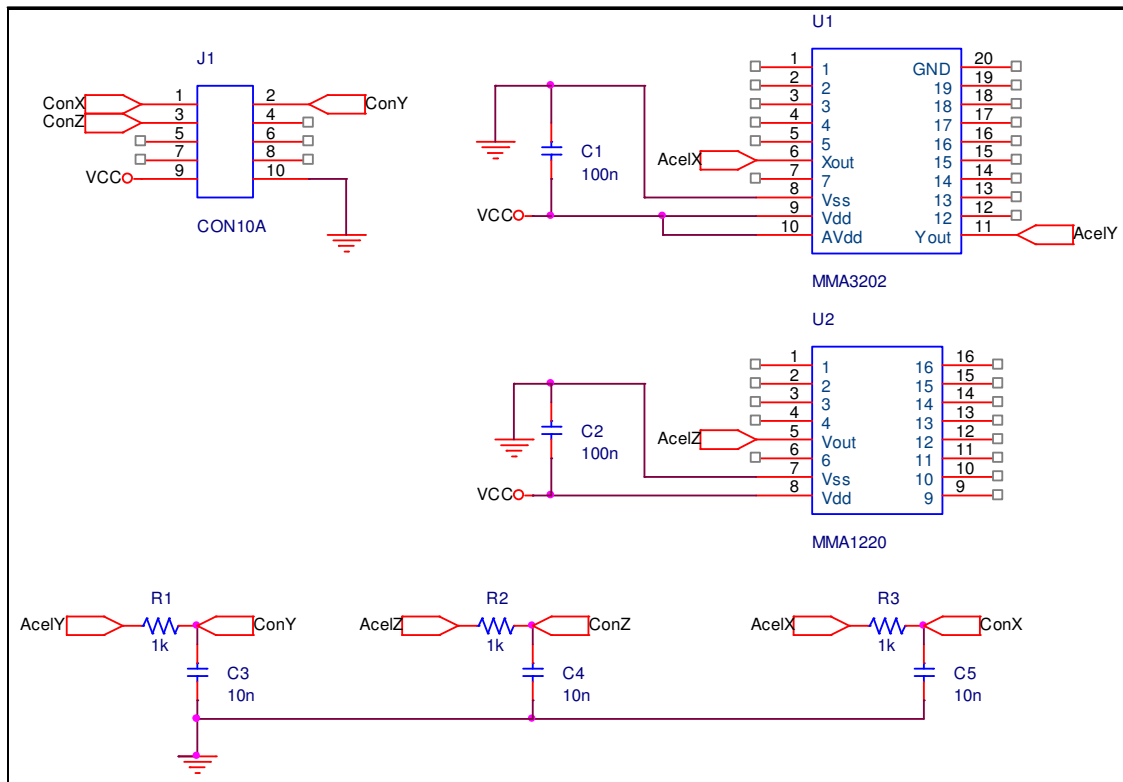


Figura 43 - Circuito de mensuração da aceleração.

#### 2.2.4.5 Circuito de RPM

O sinal de saída do *encoder* óptico é utilizado para disparar uma rotina de interrupção que é associada a determinação da RPM, este sensor foi aferido com a utilização de uma tacômetro.

#### 2.2.4.6 Micro-controlador

Como controlador das funções digitais deste projeto, utilizou-se o micro-controlador da *Texas Instruments* modelo MSP430f149. Entre as funções que este desempenha, tem-se: configuração e escrita do display de caracteres;

comunicação serial RS232 e com o transceiver de rádio freqüência; conversão de sinais analógicos; configuração e leitura do sensor de temperatura e umidade.

Utilizou-se este micro-controlador por apresentar muitas características e periféricos interessantes ao projeto. Quanto ao fato de se manterem os custos de projeto baixos, temos um compilador em linguagem C de licença GNU, disponibilidade de amostras provenientes do fabricante, e prévia experiência na utilização deste. Quanto aos periféricos, ele incorpora um conversor analógico digital (A/D) de 12 bits de resolução e 8 canais, máquina de estado para comunicação serial, sistema de interrupção externa com 16 entradas, entre outras.

Na Figura 44, tem-se o diagrama dos pinos do MSP430 e na Figura 45 o diagrama de blocos fornecido pelo fabricante.

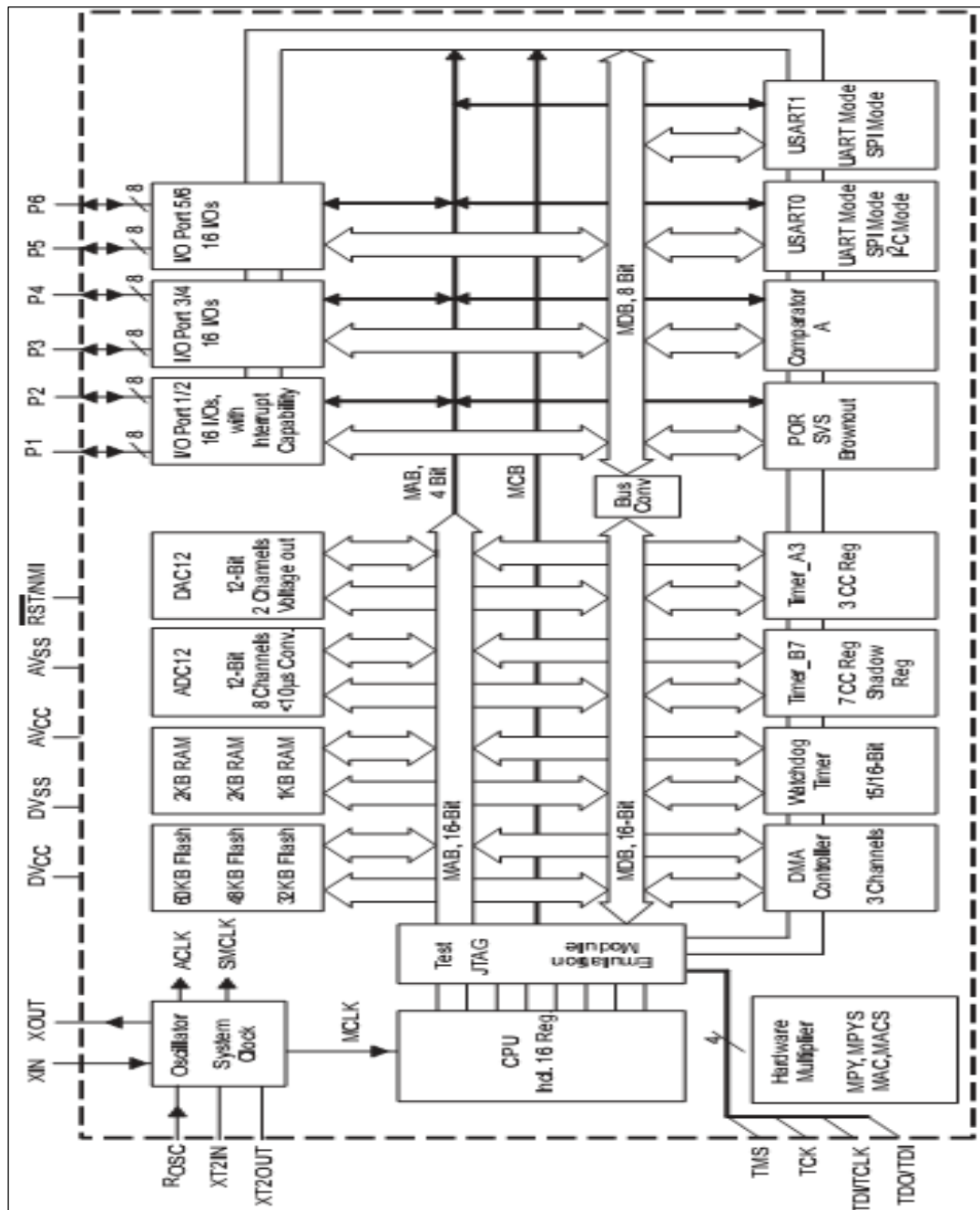


Figura 44 – Diagrama de blocos do MSP430f149.

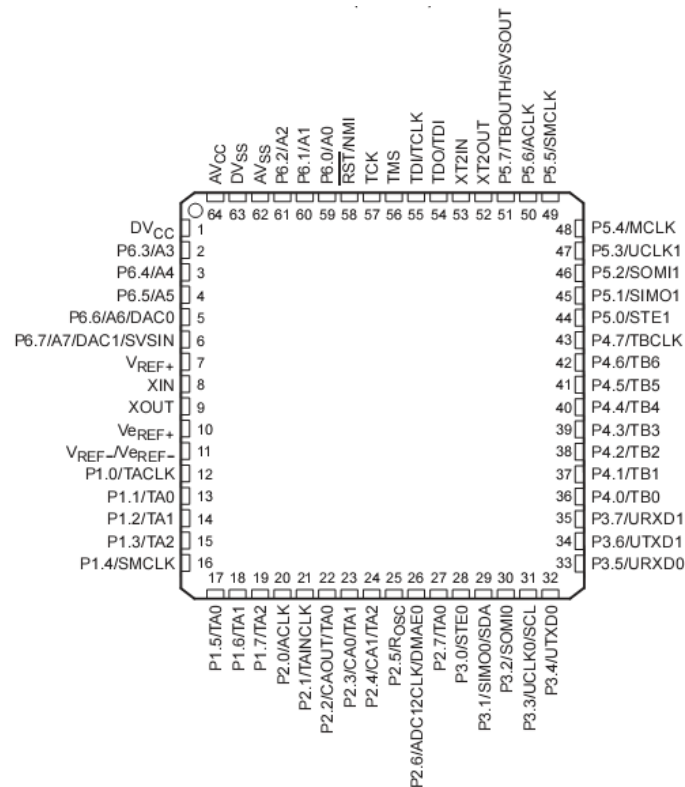


Figura 45 – Diagrama dos pinos do MSP430f149.

Durante a fase de testes utilizou-se a placa de desenvolvimento projetada e confeccionada pelo Centro de Microgravidade. Ela possibilita o acesso a todas as funções do micro-controlador, bem como apresenta um *driver* para comunicação serial RS232, saída para display de LCD e circuitos de gravação (JTAG e BSL) do micro-controlador.

Na Figura 46 tem-se o esquemático usado para esta placa de circuito impresso (PCI). E na Figura 47 tem-se a placa montada.

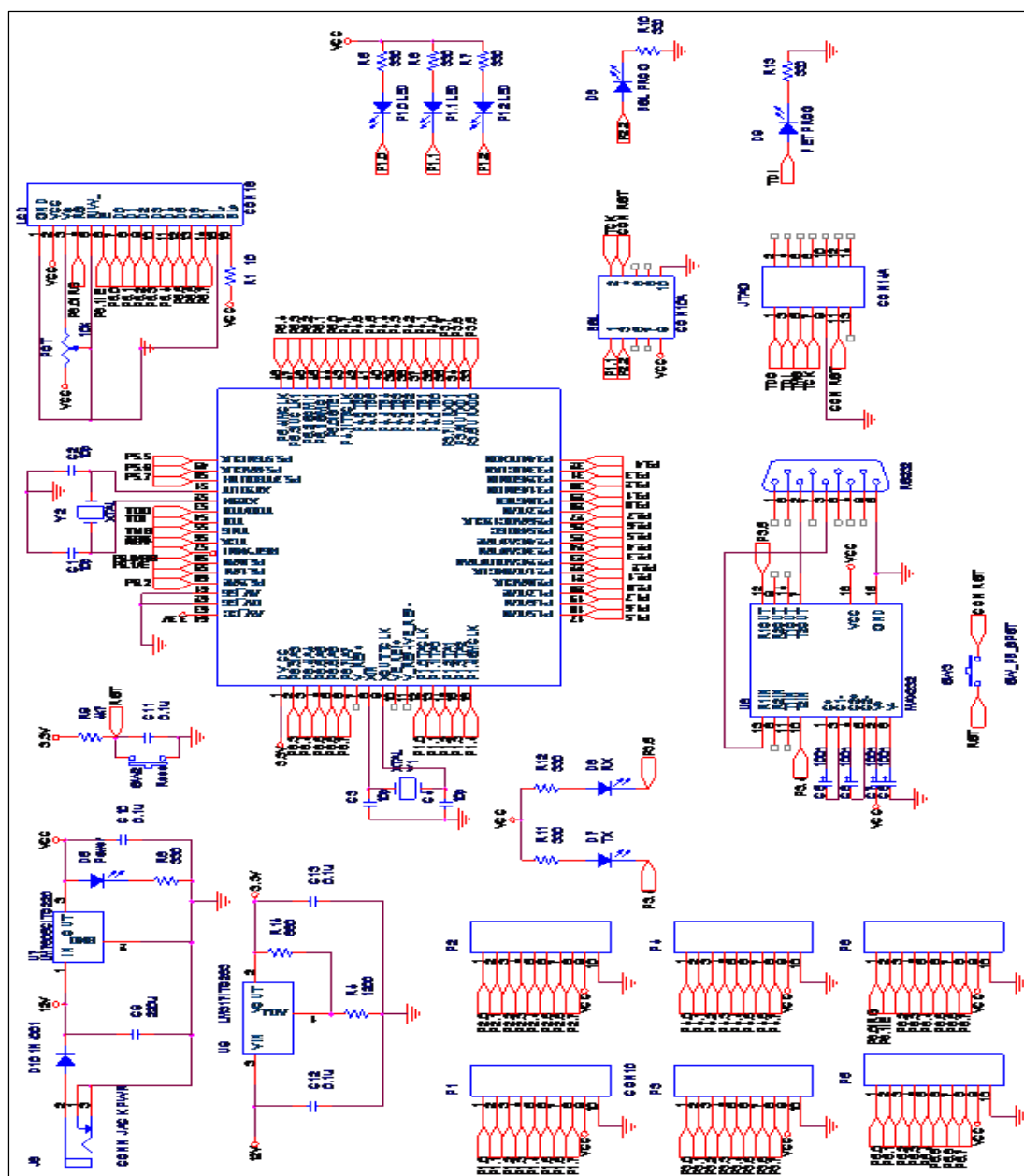
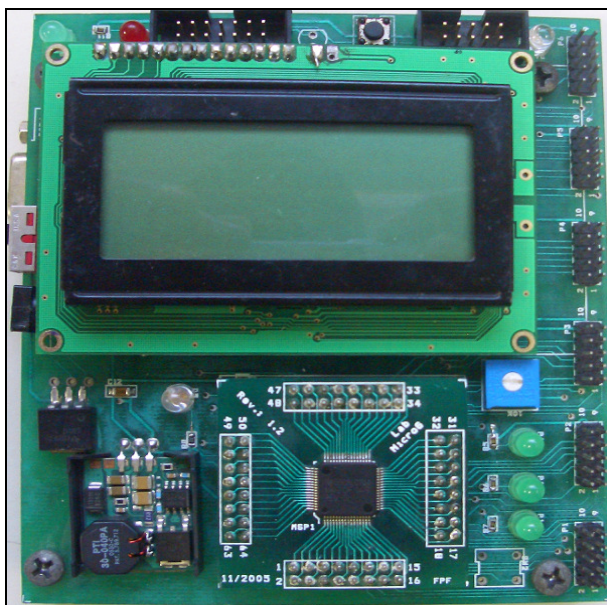


Figura 46 – Diagrama esquemático da placa do micro-controlador.

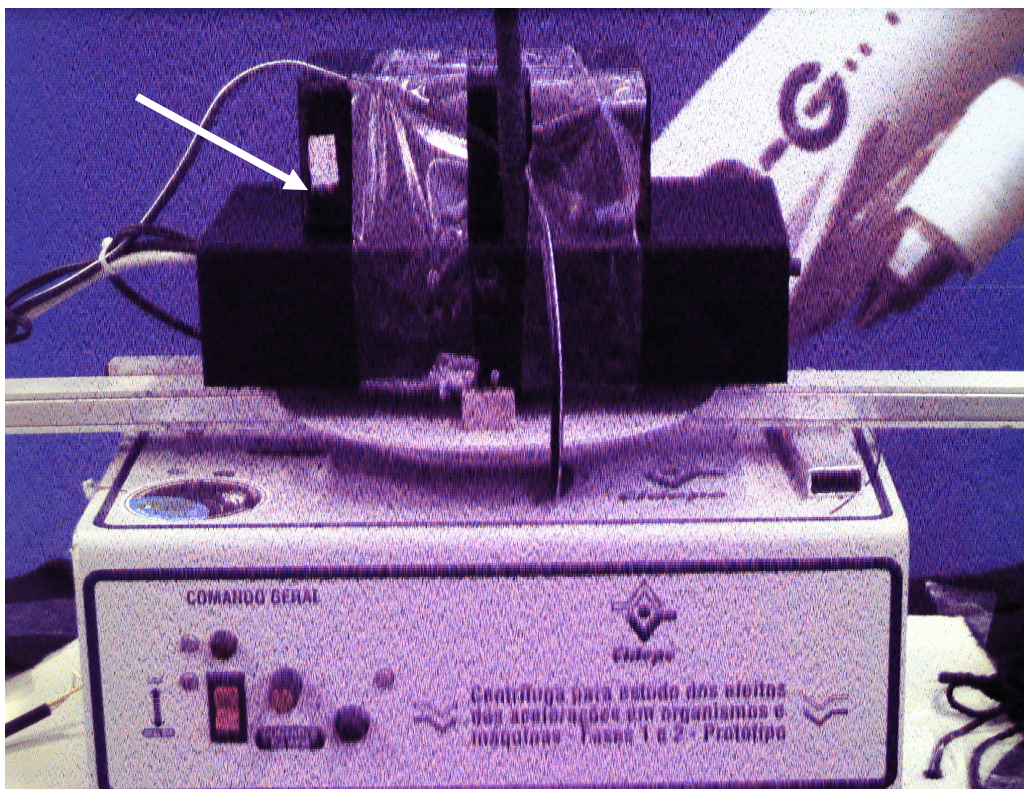


**Figura 47 – Placa do micro-controlador montada.**

Como este projeto apresenta duas interfaces de controle, uma do PC com o *transceiver* de recepção e outra do dispositivo remoto de aquisição de sinais com seus periféricos e com o *transceiver* de transmissão, utilizou-se duas destas placas.

#### ***2.2.4.7 Caixa de Proteção dos Circuitos da Gôndola***

Na Figura 48, está a visualização da centrífuga de pequeno porte e da caixa de proteção dos circuitos da gôndola, localizada no disco de rotação do braço da centrífuga, posicionado no centro de rotação da centrífuga onde a força G é menos atuante.

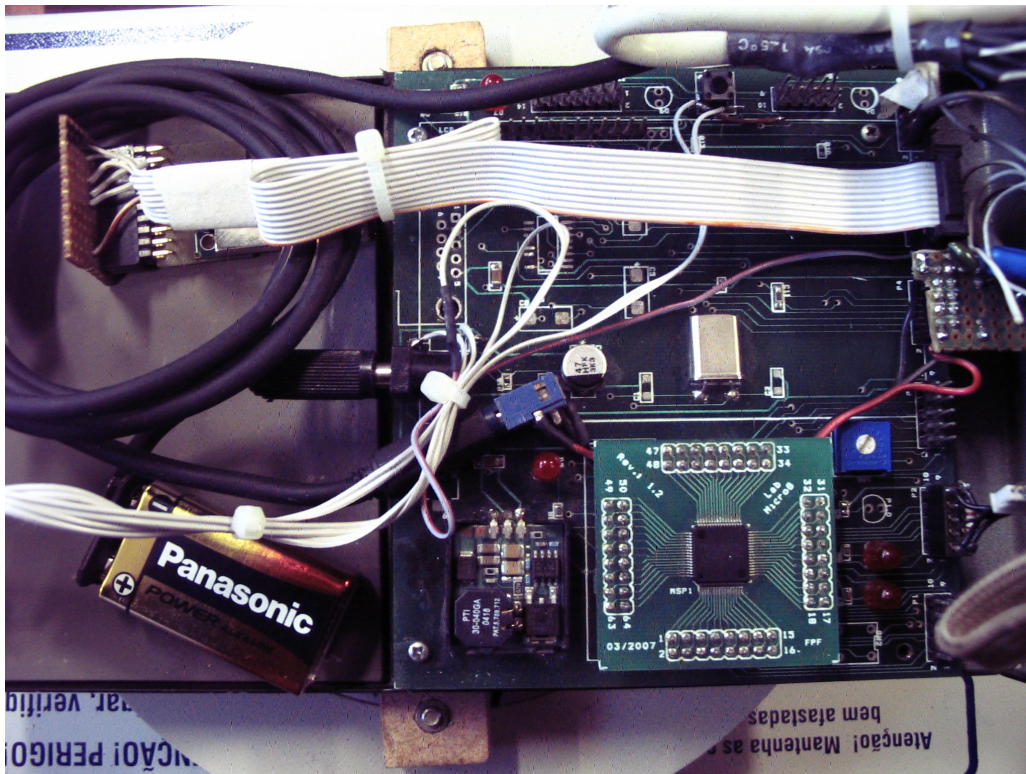


**Figura 48 – Caixa de proteção dos circuitos da gôndola: visão externa.**

Sobre a caixa de proteção ainda há uma bateria de 12 V para suprir alimentação aos diversos componentes instalados.

Na Figura 49 está o circuito do micro-controlador que fica disposto dentro da caixa de proteção localizada no centro de rotação da centrífuga, fixada no disco de rotação do braço da centrífuga. O circuito precisa de uma bateria de 9 V para funcionar, e esta fica fixada dentro da caixa.

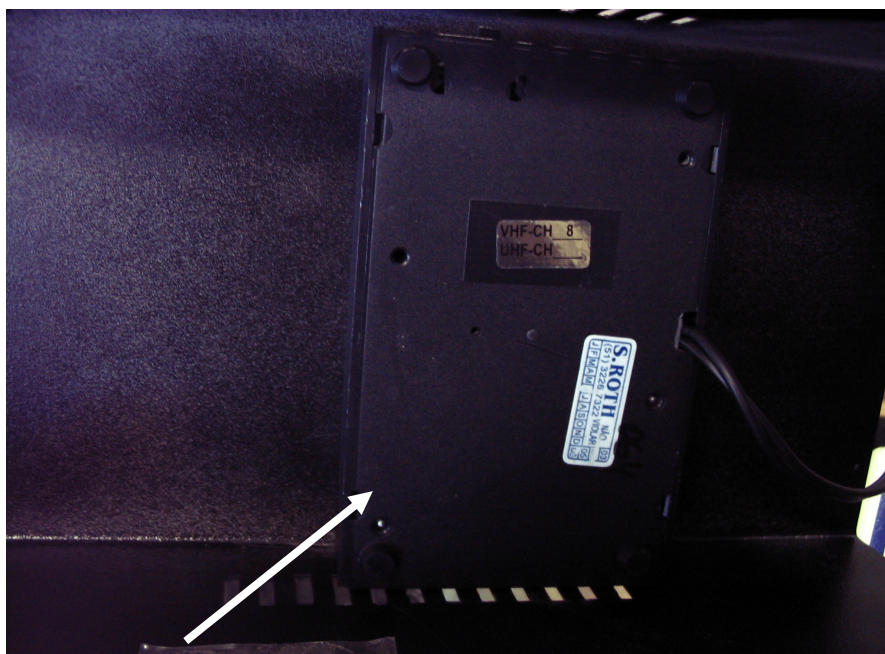




**Figura 49 – Circuito micro-controlador da centrífuga.**

Na Figura 50 está o dispositivo de transmissão em VHF, *Vídeo Link*, fixado na tampa da caixa de proteção, junto aos demais sensores. Assim, todos os componentes eletrônicos ficam concentrados ou na caixa de proteção no centro da centrífuga ou instalados na gôndola.

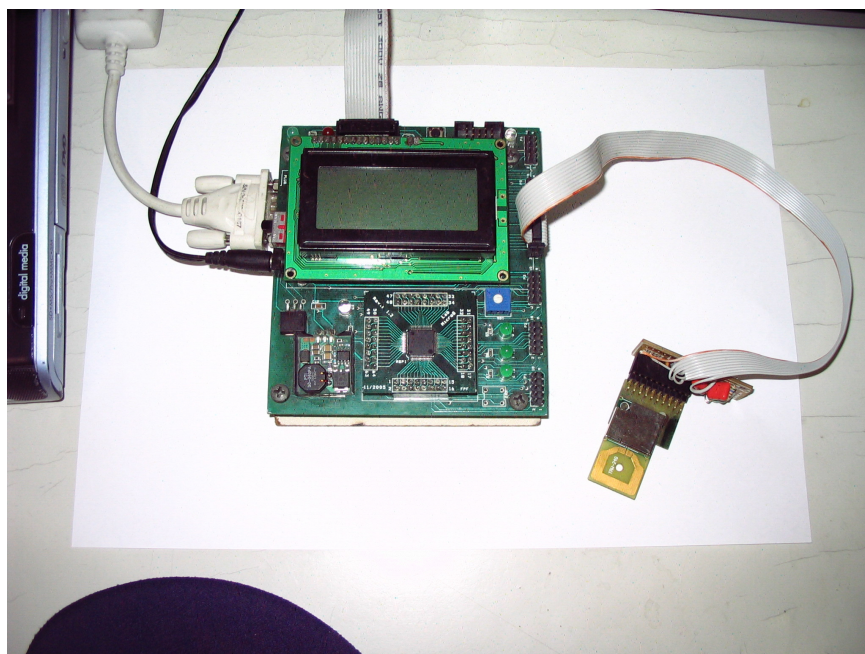




**Figura 50 – Fixação do Vídeo Link na tampa da caixa de proteção.**

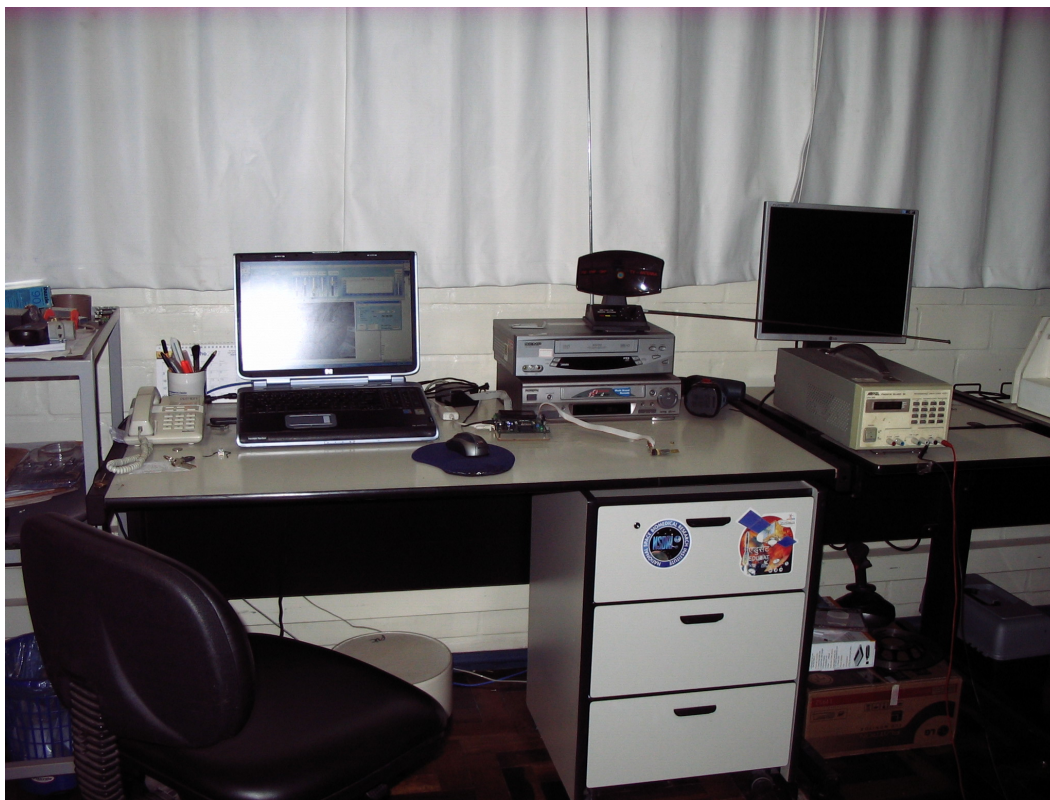
#### ***2.2.4.8 Equipamentos Externos à Centrífuga***

A Figura 51 demonstra o circuito micro-controlador de recepção acoplado ao microcomputador através de um cabo serial, responsável por captar os sinais dos sensores emitidos pela centrífuga e enviá-los ao microcomputador pela porta serial padrão RS232.



**Figura 51 – Circuito micro-controlador de recepção.**

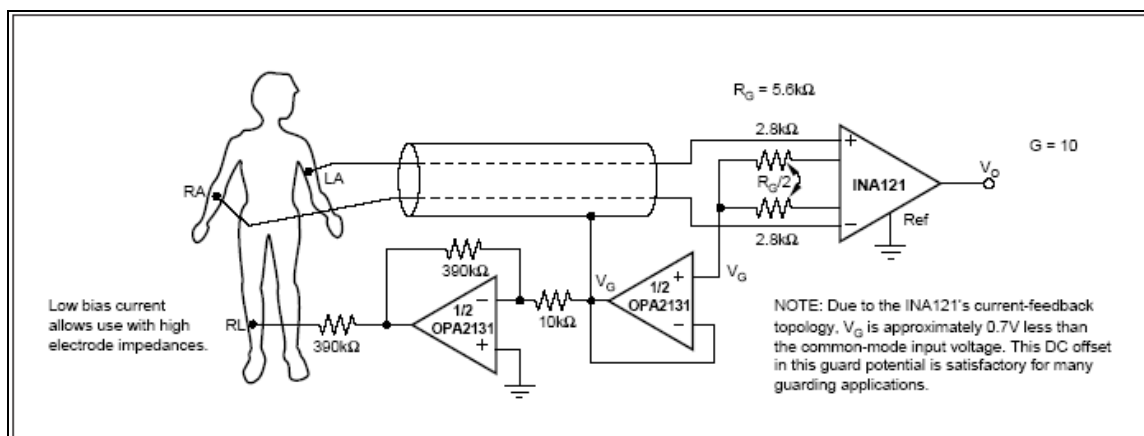
A diante na Figura 52 está apresentado o ambiente de trabalho com o microcomputador, onde esta em execução o programa desenvolvido, o circuito de recepção de sinais, emitidos pelos sensores, conectado ao computador, e o dispositivo de VHS também conectado ao microcomputador, juntamente com uma antena portátil.



**Figura 52 – Ambiente de trabalho externo à centrífuga.**

#### ***2.2.4.9 Sistema de Monitoramento Biomédico***

O sistema de monitoramento da frequência cardíaca é baseado no circuito demonstrado na Figura 53, é o único sistema biomédico implementado até o momento. Idealizado para realização de experimento com animais de pequeno porte, possui um calibração adaptável a cada tipo de ser vivo e pode ser usado futuramente na centrífuga humana para o monitoramento cardíaco do indivíduo.



**Figura 53 - ECG with Right-Leg Drive**

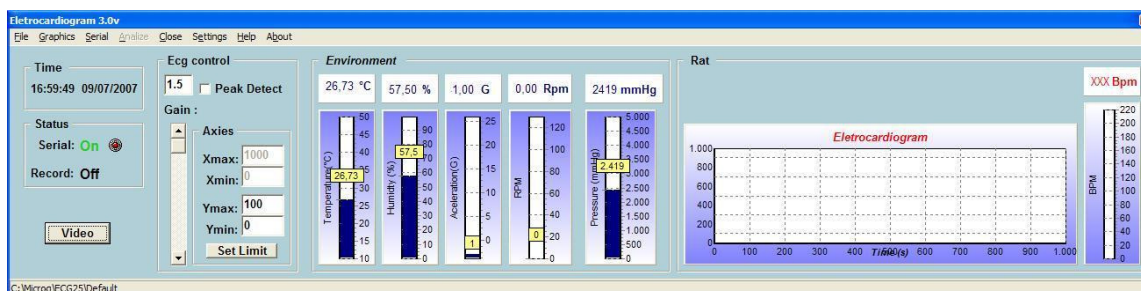
Para a visualização e armazenamento do ECG é feito a digitalização via conversor A/D e seu envio via enlace de raio. A taxa de amostragem conseguida com o presente dispositivo é de aproximadamente 62Hz. Os dados são disponibilizados sem tratamento digital sendo os valores adquiridos pelo conversor A/D impressos diretamente.

## 2.3 Software Desenvolvido

Para a comunicação assíncrona entre o adaptador para conversão dos sinais de rádio foi usado comunicação serial RS232. Para aquisição dos sinais provenientes da porta serial foi utilizada a biblioteca de funções de comunicação serial de distribuição gratuita *ComPort Library versão 2.64* (Dejan Crnila e Lars Dybdah 2005). Compatível com Delphi™ versão 7.0, que foi usado no desenvolvimento deste projeto.

O programa desenvolvido permite a visualização dos valores dos sensores em estado de repouso. O programa possui alguns controles de ganho para o sinal do ECG e alguns valores de ajuste que precisam ser calibrado, de acordo com o corpo de prova.

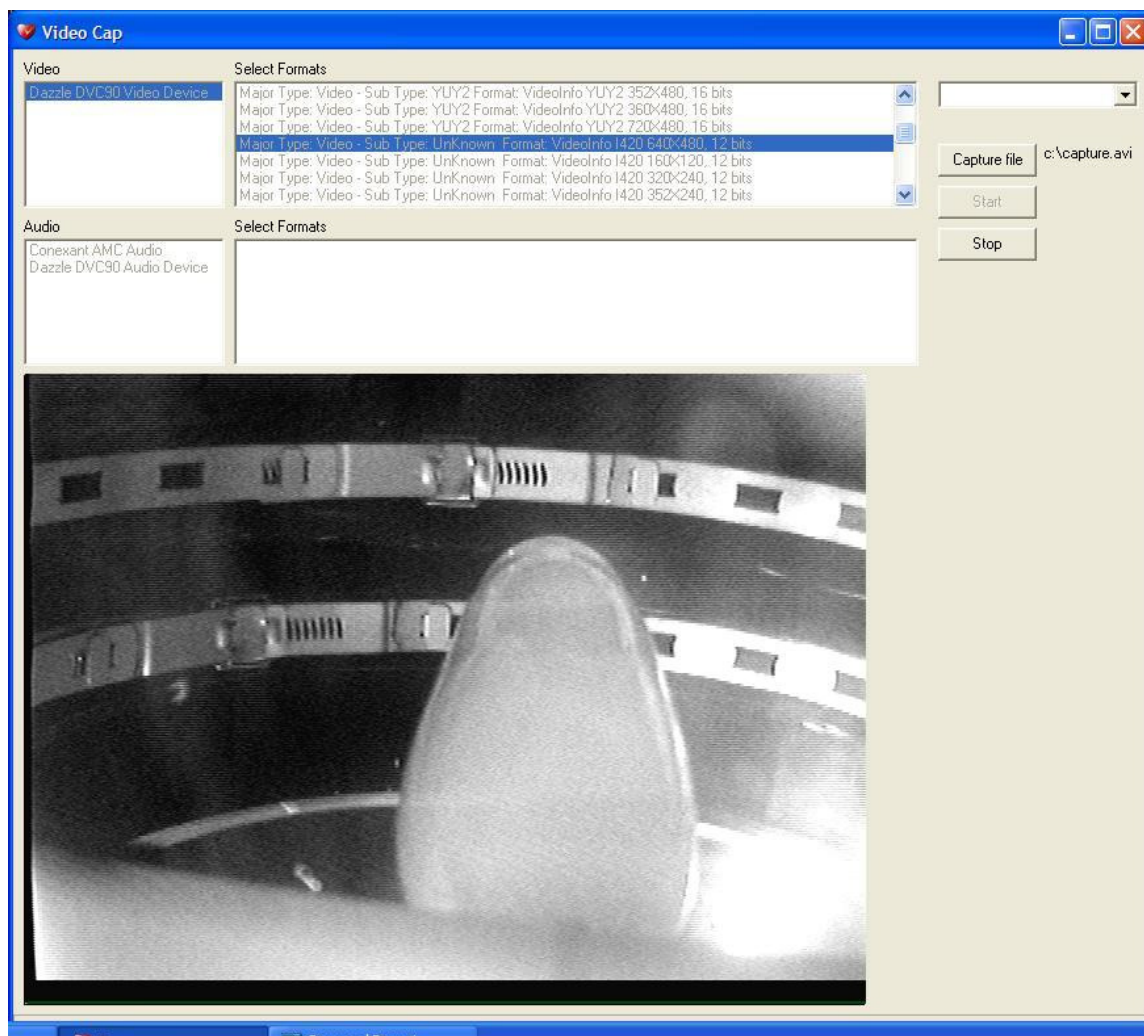
A Figura 54 demonstra a tela principal do programa desenvolvido, que permite a visualização dos valores dos sensores em estado de repouso. O programa possui alguns controles de ganho para o sinal do ECG e alguns valores de ajuste que precisam ser calibrado de acordo com cada corpo de prova.



**Figura 54 – Demonstração da tela principal do programa.**

Este programa possui um botão chamado Vídeo que abre uma nova janela com o vídeo captado pela câmera acoplada à gôndola. Vídeo este transmitido por um modulador e transmissor de sinais de vídeo *VÍDEO LINK*, recebido por um vídeo cassete e disponibilizado no micro computador por uma placa de captura *DAZZELE 90*. Na Figura 55 está um exemplo da janela contendo o vídeo.





**Figura 55 – Janela de visualização das imagens da gôndola.**

Esta janela foi implementada utilizando uma biblioteca de funções chamada *DSPack* de livre distribuição (Gustavo Huffenbacher Daud, 2005). Esta biblioteca permite utilizar o dispositivo de vídeo do *Windows* disponibilizado pelo *Dazzle 90*, conectado no microcomputador por uma porta USB.

Assim tem-se a imagem vinda da gôndola e os valores dos sensores, internos à gôndola, na tela do computador em tempo próximo ao real, como pode ser visualizado na Figura 56.



**Figura 56 – Tela do computador com o programa em execução.**

## CAPÍTULO III – RESULTADOS

### **3.1 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS**

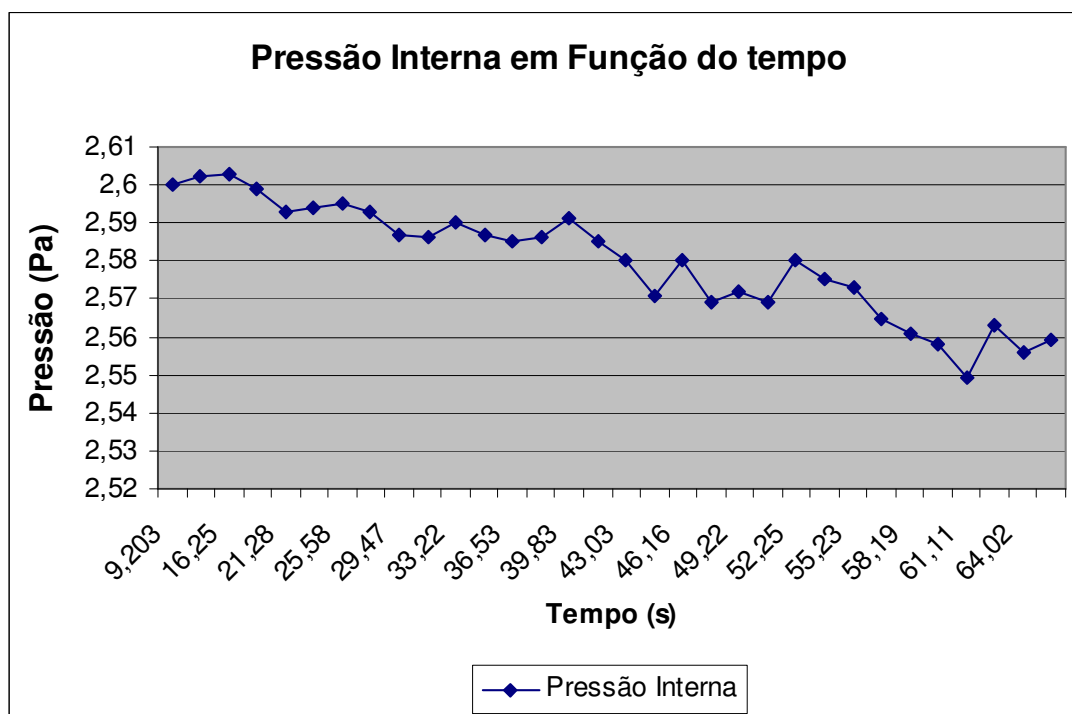
Quando prontas as instrumentações da gôndola, iniciou-se a coleta dos dados, incluindo os processos de aferição dos instrumentos e a sincronização entre todos os sensores e placas. A Tabela-01 demonstra os valores obtidos dos sensores de pressão, temperatura, umidade, aceleração e velocidade angular. Estes dados foram registrados e armazenados pelo programa em formato de arquivo para posterior análise.



**Tabela 01 – Valores obtidos dos sensores e gravados pelo programa.**

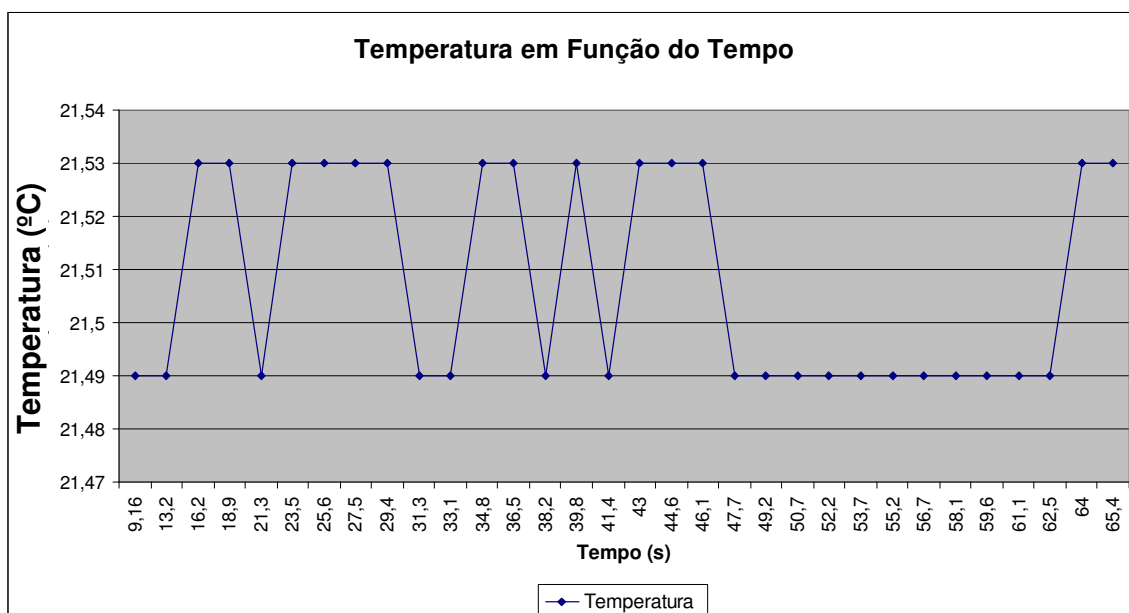
| Tempo (s) | Pressão (Pa) | Temperatura (°C) | Umidade (%) | Aceleração (G) | Velocidade Angular (rpm) |
|-----------|--------------|------------------|-------------|----------------|--------------------------|
| 9,14      | 2,6          | 21,49            | 56,79       | 1,123          | 3                        |
| 13,13     | 2,602        | 21,49            | 56,76       | 1,123          | 15                       |
| 16,2      | 2,603        | 21,53            | 56,73       | 1,084          | 20                       |
| 18,84     | 2,599        | 21,53            | 56,73       | 0,986          | 23                       |
| 21,23     | 2,593        | 21,49            | 56,73       | 1,202          | 25                       |
| 23,45     | 2,594        | 21,53            | 56,73       | 1,084          | 27                       |
| 25,53     | 2,595        | 21,53            | 56,73       | 1,36           | 29                       |
| 27,52     | 2,593        | 21,53            | 56,73       | 1,242          | 30                       |
| 29,42     | 2,587        | 21,53            | 56,73       | 1,518          | 31                       |
| 31,27     | 2,586        | 21,49            | 56,73       | 1,36           | 33                       |
| 33,06     | 2,59         | 21,49            | 56,73       | 1,38           | 33                       |
| 34,78     | 2,587        | 21,53            | 56,73       | 1,616          | 35                       |
| 36,48     | 2,585        | 21,53            | 56,7        | 1,439          | 36                       |
| 38,14     | 2,586        | 21,49            | 56,73       | 1,734          | 36                       |
| 39,78     | 2,591        | 21,53            | 56,7        | 1,577          | 37                       |
| 41,39     | 2,585        | 21,49            | 56,73       | 1,518          | 37                       |
| 42,98     | 2,58         | 21,53            | 56,73       | 1,636          | 38                       |
| 44,56     | 2,571        | 21,53            | 56,7        | 1,616          | 38                       |
| 46,11     | 2,58         | 21,53            | 56,73       | 1,695          | 38                       |
| 47,64     | 2,569        | 21,49            | 56,7        | 1,754          | 39                       |
| 49,17     | 2,572        | 21,49            | 56,73       | 1,833          | 39                       |
| 52,19     | 2,569        | 21,49            | 56,73       | 1,734          | 40                       |
| 53,69     | 2,58         | 21,49            | 56,7        | 1,774          | 40                       |
| 56,66     | 2,575        | 21,49            | 56,7        | 1,892          | 40                       |
| 58,13     | 2,573        | 21,49            | 56,7        | 1,931          | 40                       |
| 59,59     | 2,565        | 21,49            | 56,7        | 2,168          | 40                       |
| 61,06     | 2,561        | 21,49            | 56,7        | 1,931          | 41                       |
| 62,52     | 2,558        | 21,49            | 56,73       | 1,99           | 41                       |
| 63,95     | 2,549        | 21,49            | 56,7        | 2,207          | 41                       |

Após a análise da Figura 57, nota-se que a pressão interna tende a decair com o passar do tempo porque, com o aumento da velocidade relativa da gôndola em relação ao ar, isso acontece pelo efeito de *Bernoile* com o aumento da velocidade com que o ar passa por fora da gôndola a pressão deste ar cai em relação à interna da gôndola. Então o ar dentro da gôndola tende a diminuir a pressão para igualar à externa.



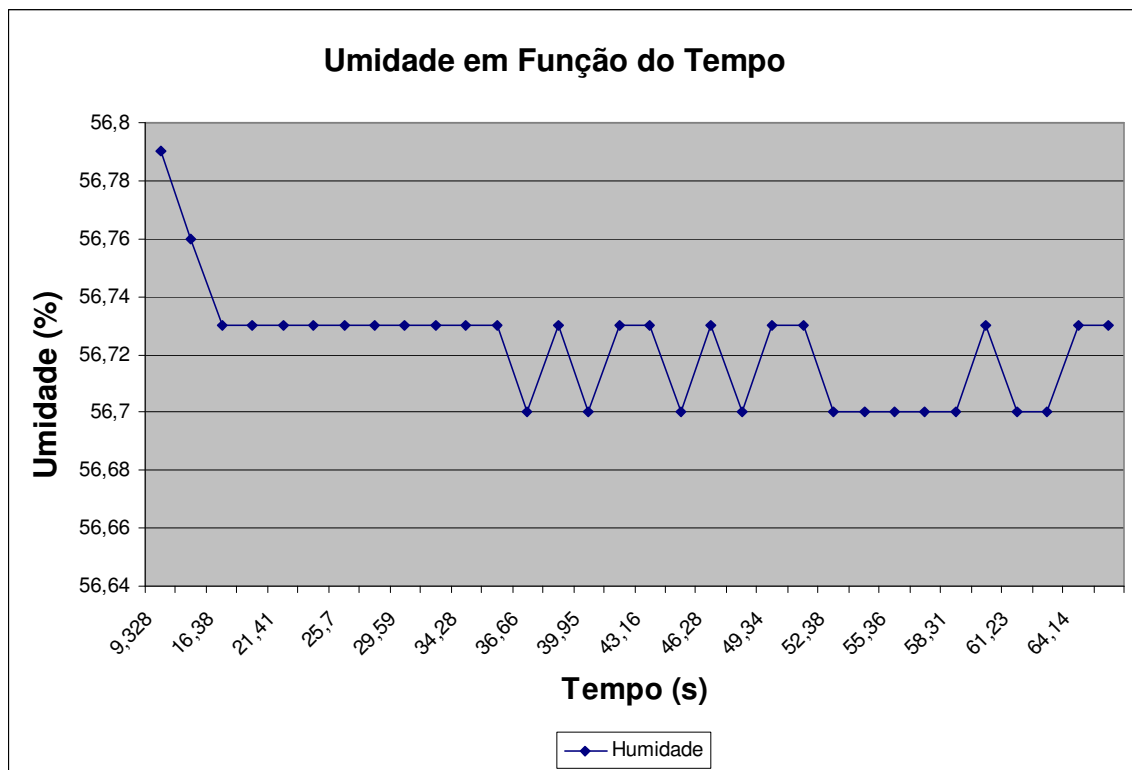
**Figura 57 – Demonstração da pressão interna em Função do Tempo.**

A Figura 58 apresenta uma instabilidade visual da temperatura em função do tempo, pois a variação da temperatura oscilou entre 21.53 °C e 21.49 °C, variação esta quase desprezível, mas detectada pela alta acuidade do sensor de temperatura. Demonstrando que a temperatura não tem relação com o aumento da rpm, durante este experimento não havia um corpo de prova vivo que pudesse interagir com a temperatura interna da gôndola.



**Figura 58 – Demonstração da temperatura em função do tempo.**

Na Figura 59 está representada uma inalteração da umidade em relação à rotação, seguindo a mesma análise realizada na Figura 58. Como existe algum fluxo de ar dentro da gôndola as medidas desses parâmetros se alternam, mas não em função da rpm. A umidade relativa do ar, interno à gôndola, variou entre 56,79% à 56,7%, sem influência de um ser vivo como corpo de prova.



**Figura 59 – Demonstração da Umidade em Função do tempo.**

As Figuras 60 e 61 confirmaram o bom desempenho do conjunto de sensores. Houve uma limitação na velocidade angular empregada, pouco mais de 40 rpm, limitando também a Força-G máxima atingida, próximo a 2,5 G. O objetivo principal foi de avaliar o conjunto.

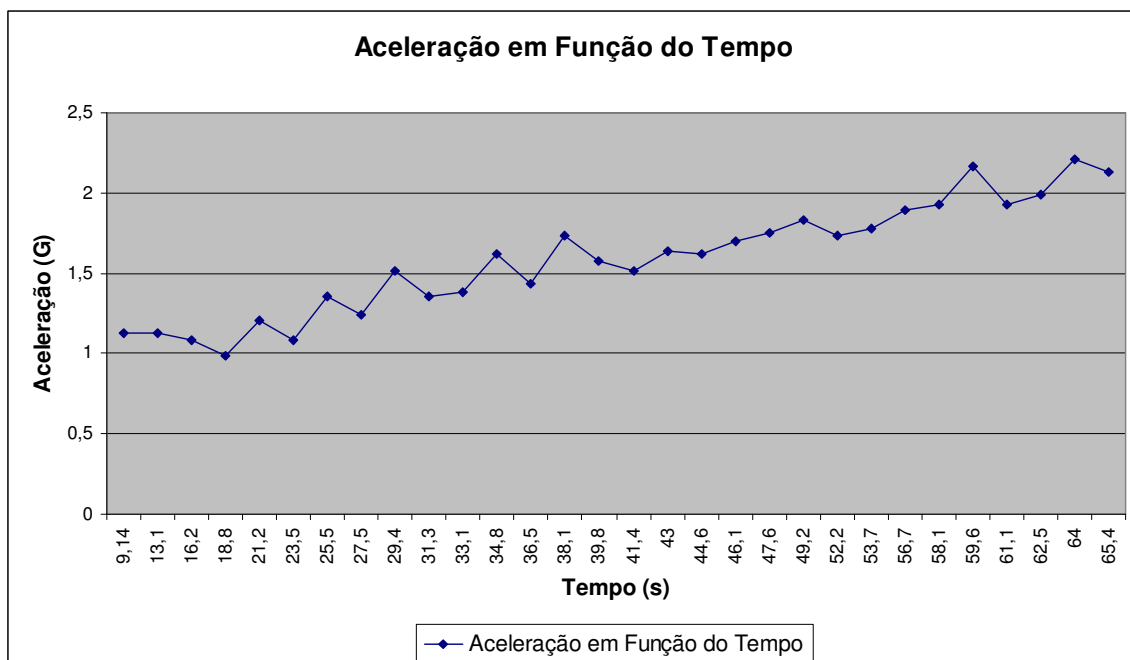


Figura 60 – Demonstração da aceleração em função do tempo.

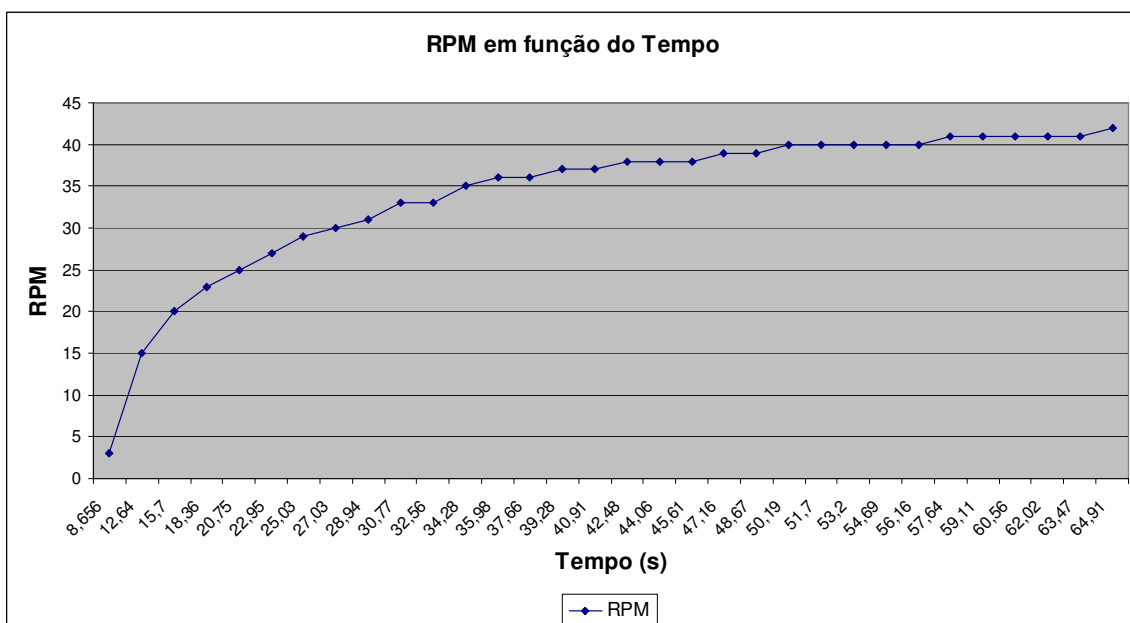


Figura 61 – Demonstração do RPM em função do tempo.

Na Figura 62 tem-se uma amostra do sinal obtido a partir do circuito de ECG durante um ensaio realizado em um voluntário. Durante o teste o voluntário foi instrumentado com sensores de superfície e a uma distância de aproximadamente de 3 m do receptor sem fio conectado ao microcomputador. Representando assim o corpo de prova a ser exposto à simulação de hipergravidade no interior da gôndola.

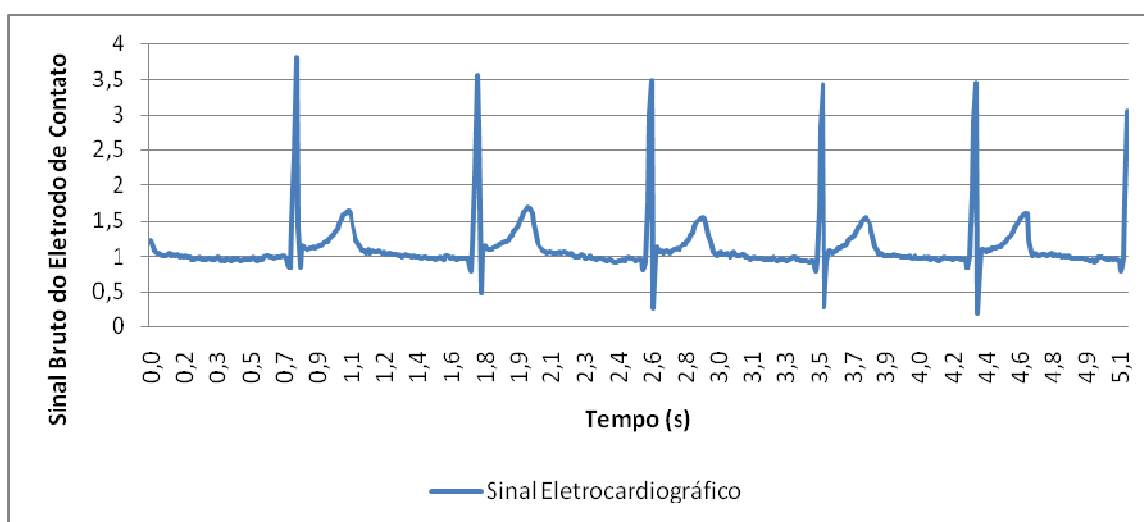
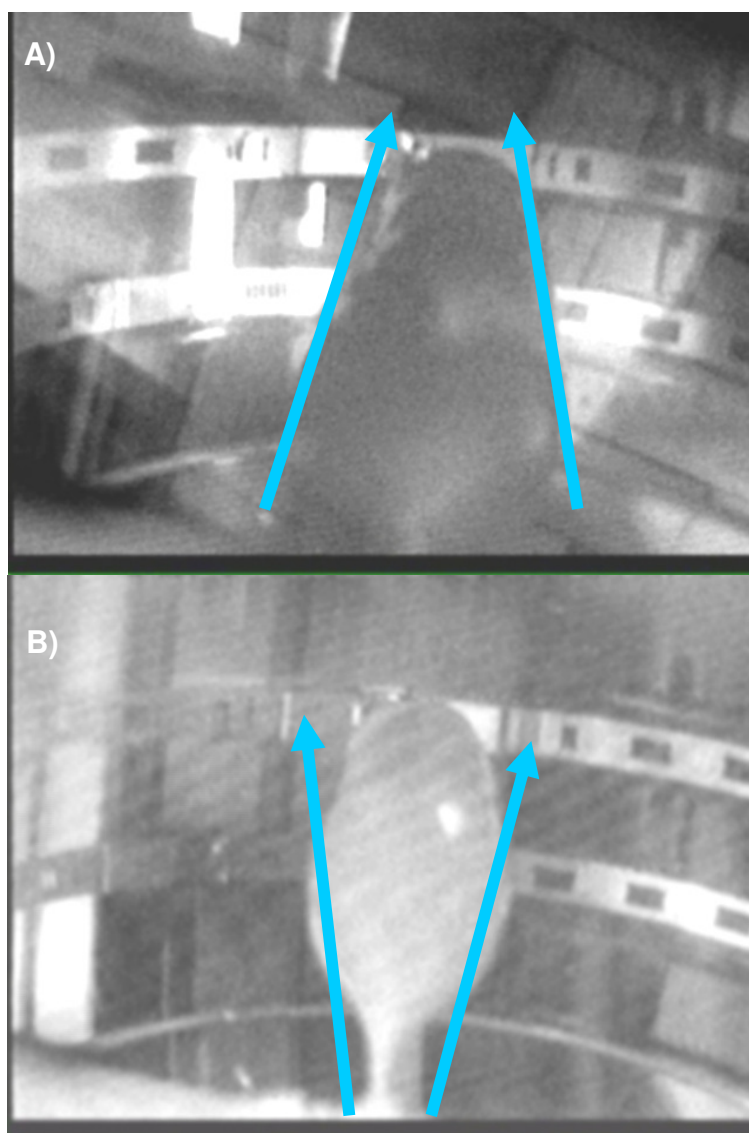


Figura 62 – Gráfico do ECG gerado a partir dos dados gravados.

### 3.2 Análise das Imagens do Corpo de Prova

Na Figura 63 é apresentado, conforme as setas, o desempenho do corpo de prova do interior da gôndola. Nota-se que a base do corpo de prova tende a ficar retilínea, em relação a parte superior. Neste instante a gôndola posiciona-se verticalmente, fazendo com que fluidos sejam direcionados em sentido

longitudinal, conforme é demonstrado na Figura 63B, em comparação a Figura 63A.



**Figura 63 – Desempenho do corpo de prova no interior da gôndola.**

Primordialmente foi desenvolvido um software responsável pela disposição dos dados vindos da centrífuga na tela do computador. A centrífuga já havia sido construída em outra dissertação de mestrado, foram acrescentados a ela uma

gôndola e os sensores necessários para a coleta das informações pertinentes a realização desta dissertação.

O software desenvolvido serviu inicialmente para realização de testes de captação de sinais dos diversos sensores, enviados via enlace de rádio e disposição destes dados na tela do computador.

Durante o processo, a centrífuga foi isolada em uma área restrita, para garantir o livre curso de seu braço sem que este esbarrasse ou ficasse preso em algum objeto. O isolamento também garantiu a inexistência de acidentes, durante o experimento.

Para aferição do sensor de velocidade angular em rotações por minuto, fez-se necessário a utilização do tacômetro. Após estabilizar a velocidade da centrífuga e esta não sofrer variações, o valor colhido do sensor de velocidade era confrontado com o valor obtido no tacômetro.



## CAPÍTULO IV – CONCLUSÃO

Com base nos objetivos propostos, esta pesquisa mostrou-se integral quanto ao desenvolvimento de um equipamento, necessário para a elaboração de uma Gôndola com monitorização do ambiente (temperatura, umidade e pressão), capaz de comportar experimentos com animais de pequeno porte, células de cultura e plantas em uma centrífuga de pequeno porte.

A estrutura quanto o sistema desenvolvido apresentou-se bastante promissor no que diz respeito à aplicabilidade na área biomédica aeroespacial, futuramente. Para se iniciar experimentos com instrumentos in-vivo. A partir daí, é possível escolher o melhor método a ser utilizado quanto à exposição de +Gz. A utilização de protocolos de exposição à hipergravidade poderá ser um recurso bastante enriquecedor pela possibilidade de geração de estímulos variados, ainda mais vinculado a uma técnica de monitoramento tanto do meio quanto do corpo de prova, tal qual a gôndola em sua integralidade.

Em relação à instrumentação da gôndola, demonstrou-se eficaz e também atingiu as metas idealizadas.

A demonstração da centrífuga em movimento submetendo um determinado corpo de prova a elevadas forças G foi análogo à operação de uma centrífuga humana, o que, não apenas facilita a aprendizagem de suas conseqüências sobre o corpo humano dos conceitos da força G.

Em relação o limite de G alcançado, notou-se a necessidade de substituição do motor do protótipo da centrífuga. O motor original não apresentou

um desempenho desejado e faz-se necessário a substituição deste para suportar a carga da gôndola, do braço e do contrapeso.

Os cálculos abaixo revelam a velocidade angular necessária para se atingir 7G nas dimensões atuais da centrífuga, considerando o posicionamento do sensor de aceleração no interior da gôndola (75 cm do centro de rotação da centrífuga).

$$\sin \alpha = \frac{a_{G_z}}{a_R} = \frac{1}{7} = 0.143$$

$$\alpha = 8,21^\circ$$

$$\cos 8,21^\circ = \frac{a_{cent}}{a_R} = \frac{a_{cent}}{7}$$

$$a_{cent} = 0.989 \times 7 = 6.923G$$

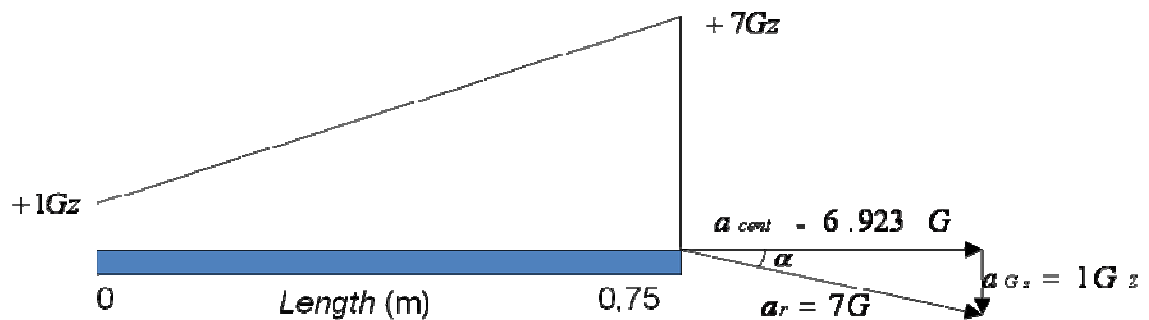
$$a_{cent} = 9.923 \times 9.81 = 67.914 \frac{m}{s^2}$$

**Equação 05**

$$a_{cent} = \omega^2 \times length$$

$$\omega = \sqrt{\frac{a_{cent}}{length}} = \sqrt{\frac{67.914}{0.75}} = 9.516 \frac{rad}{s}$$

$$9.516 \times \frac{60}{2\pi} = 90.87 rpm$$



Para tanto, através dos cálculos descritos abaixo, estimou-se um motor com uma potência ideal para realização de experimentos em hipergravidade, com a utilização das ferramentas desenvolvidas e idealizadas nesta dissertação.

Para o cálculo da potência do motor foi necessário calcular o torque e, antes de tudo, o momento de inércia dos corpos envolvidos, que são a gôndola, o

braço da centrífuga e o contrapeso. A potência do motor atual é de 2,07W sendo o ideal de 42 W, conforme cálculos abaixo, o que levaria a alcançar a velocidade angular desejada de 90 rpm que gera uma aceleração de aproximadamente 7 G nas dimensões atuais da centrífuga.

#### Momento de Inércia do Braço da Gôndola

$m = 3.5 \text{ kg}$  (massa do braço)

$c = 1.2 \text{ m}$  (tamanho de ponta a ponta)

$$I = (m * c^2) / 12 \quad \textbf{Equação 06}$$

$$I = 0.42 \text{ kgm}^2$$

São duas fórmulas distintas para o calculo do Momento de Inércia da gôndola e do braço, pois estão em posições diferentes e possuem formato diferente de uma barra (formato do braço).

#### Momento de Inércia da Gôndola

$m = 4.5 \text{ kg}$  (massa da gôndola)

$d = 0.76 \text{ m}$  (distância do centro de rotação)

$$I = m * d^2 \quad \textbf{Equação 07}$$

$$I = 2,599 \text{ kgm}^2$$

#### Momento de Inércia do Contrapeso

$m = 4.5 \text{ kg}$  (massa do contrapeso)

$d = 0.6 \text{ m}$  (distância do centro de rotação)

$$I = m * d^2$$

$$I = 1,62 \text{ kgm}^2$$

### Momento de Inércia Total

$$I = I_b + I_g + I_c \quad \textbf{Equação 08}$$

onde  $I_b$  = momento de inércia do braço

onde  $I_g$  = momento de inércia da gôndola

onde  $I_c$  = momento de inércia do contrapeso

$$I = 0,42 + 2,599 + 1,62$$

$$I = 4,639 \text{ kgm}^2$$

Após o cálculo do Momento de Inércia Total, este valor será utilizado para calcular o torque que o motor deve ter.

$$t_a = \frac{I}{T} * \omega a \quad \textbf{Equação 09}$$

Onde  $\omega a = 9,425 \text{ rad/s}$  e corresponde à velocidade angular desejada de 90 RPM convertida para radianos por segundo,  $t_a = 10 \text{ s}$  e corresponde ao tempo em que o motor deve levar para atingir a velocidade angular desejada,  $I = 4,639 \text{ kgm}^2$  o qual corresponde ao momento de inércia total calculado anteriormente e  $T$  corresponde ao torque que precisamos calcular.

Assim:

$$T = \frac{I}{ta} * \omega a$$

$$T = \frac{4,639}{10} * 9,45$$

$$T = 4,43Nm$$

De posse do torque, basta calcular a potência, expressa pela equação abaixo:

$$P = T * \omega a \quad \textbf{Equação 10}$$

Onde  $P$  é a potência que precisa ser encontrada,  $T$  é o torque desejado e  $\omega a$  corresponde a velocidade angular desejada expressa em radianos por segundo.

$$P = 4,43 * 9,425 = 41,79W$$

Então através destes cálculos em função da velocidade angular desejada, do tempo esperado para que o motor atinja tal velocidade e dos pesos dos equipamentos (gôndola, braço da centrífuga e contrapeso) temos uma potência ideal 42W aproximadamente.

- Implementou-se as alterações mecânicas na estrutura da centrífuga, como no braço para suportar a gôndola e contra-pesa, e melhorias quanto ao motor da centrífuga de pequeno porte, para suportar o peso da gôndola e do contra-peso;
- Desenvolveu-se um ambiente em acrílico para acoplar um corpo de prova como plantas, animais de pequeno porte e/ou células cultura, denominado gôndola;

- Testou-se a aerodinâmica (formato) da gôndola, sugerindo a menor resistência ao ar;
- Alterações no software, para suportar as novas funcionalidades de monitorização do corpo de prova pelo ECG e monitorização do ambiente interno da gôndola por meio de sensores de pressão, temperatura, umidade e aceleração;
- Obteve-se um melhor acompanhamento na monitoração do corpo de prova tanto próximo ao tempo real quanto fazendo análises a partir dos arquivos de registro;
- Possibilitou uma avaliação para determinar as melhores condições fisiológicas a qual o corpo de prova fica submetido em uma situação de hipergravidade, por meio dos sensores de pressão, temperatura, umidade e aceleração.

## ESTUDOS FUTUROS

Os seguintes ao desenvolvimento da Gôndola para realização em experimentos em hipergravidade serão:

- Possibilitar a análise para determinação se há alterações cardíacas estruturais e funcionais causadas pela exposição à hipergravidade por meio dos novos sensores instalados na centrífuga;
- Validação da Gôndola como instrumento de utilização de experimentos em hipergravidade com animais de pequeno porte, encaminhado ao Comitê de Ética da PUCRS, de título: Validação E Aprimoramento de uma gôndola para realização em experimentos em Hipergravidade, utilizando-se animais de pequeno porte, como roedores, da espécie camundongo, Totalizando 10 camundongos machos, onde serão expostos a diferentes +Gz;
- Através dos novos sensores instalados na centrífuga, possibilitar a análise das influências simpáticas e parassimpáticas no ritmo cardíaco durante os experimentos em hipergravidade;
- Troca gasosa: em uma das faces laterais da cúpula fixar a implementação de sensores que registraram as trocas gasosas.

## REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. Microgravidade. Disponível em:

<<http://www.aeb.gov.br>> Acesso em: 15 nov. 2004

A.C. Guyton.: Tratado de Fisiologia Médica. 5ª. Ed. Rio de Janeiro: Interamericana, 1976.

ALBARY, WILLIAM B. Acceleration in Other Axes Affects +Gz tolerance: Dynamic Centrifuge Simulation of Agile Flight, Aviation Space Environment Medicine, volume 75, number 1, januray 2004,PP.1-6.

ALONSO, M.,FINN, E.J.: Física – Um Curso Universitário, volume 1 – Mecânica; editora Edgard Blucher, São Paulo-SP, 1972.

BERR, F.P. & RUSSELL, E.: Mecânica Vetorial para Engenheiros – Estática. Volume 1,5ª Edição, Editora MB Makron Books, 1991.

COELHO, Rodrigo Pessano: *Desenvolvimento de Centrífugas para Experimentos em Hipergravidade*, Dissertação de Mestrado – PUCRS 2005.

GASPAR, A.: Física Mecânica, Volume 1, 1ª Edição, Editora Ática. São Paulo,2000.

GAZENKO OG, GRIGOR'EV AI, EGOROV AD. Physiological effects of weightlessness on humans under space flight conditions. Human Physiol 1997;2: 248-55.

GELL



GILLINGHAM, Kent K; PREVIC, Fred H. Spatial Orientation in Flight. In: DEHART, Roy L. (Ed). **Fundamentals of Aerospace Medicine**. 2<sup>nd</sup>. Ed. Baltimore: William & Wilkins, 1985.p.309-307.

GOLDIM, J.R. Manual de Iniciação à Pesquisa em Saúde. Editora DaCasa. Porto Alegre, 2000.

GUYTON, Arthur C; HALL, John E. **Tratado de fisiologia Médica**. 10<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 2002.p.150.

HALL ,S. Biomecânica básica. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2000.

M.C. Tavares, “Aquisição e processamento de sinais bioelétricos neurofisiológicos intraoperatórios,” Ph.D. Thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

M.C. Tavares, *Projetando com Microcontroladores 8XC196 (Designing with 8XC196 microcontrollers)*. Pelotas: Educar, 342 p. (Portuguese), 2000.

NASA. Classrom Subjects – Space Science. Disponível em: <http://www.nasa.gov/audience/foreducators/topnav/subjects/spacescience/index.html>.

## PROJETO EDUCAR- MECÂNICA GRÁFICA

Página Inicial < <http://educar.sc.usp.br/fisica/indice.html>>

Movimento Circular <<http://educar.sc.usp.br/fisica/circteio.html>>

Movimento Gravitacional <<http://educar.sc.usp.br/fisica/movgrav.html>>

R.J. Lefkowitz, B. B. Hoffman, and P. Taylor P., “Neurotransmissão – Os sistemas nervosos autônomo e motor somático,” in Goodman & Gilprattice, “ Medical & Biological Engineering & Computing, 28, pp. 389-397,1990.

ROSA, Maurício Machado: Desenvolvimento de um Sistema de Comunicação e Monitoramento de Centrífugas, Dissertação de Mestrado – PUCRS 2005.

Revista de Medicina Aeronáutica y Ambiental

Página inicial <[http://www. Semae.org/revista.htm](http://www.Semae.org/revista.htm)>

Entrenamiento Fisiológico: <<http://www.semoe.org/entrenamiento.htm>>

SHENDER, BARRY S., PhD.: Human Tolerance to Gz Acceleration Loads Generated in High-Performance Helicopters, Aviation Space Environment medicine 2001; 72:693-703.

SHENDER, BARRY S.,FORSTER, ESTRELLA M., HREBIEN, LEONID; RYOO, HAN CHOO; CAMMAROTA, JOSEPH P., Acceleration-Induced Near-Loss of Consciousness: The “A-LOC” Syndrome, Aviation Space Environment Medicine, Volume 74, Number 10, October 2003, pp. 1021-1028.

SANTOS, P.E.; BONANINO, M.H. Efeitos cardiovasculares agudos da exposição ao ambiente microgravitacional. Arq Brás Cardiol: volume 80 (nº1), 105-115,2003.

TAVARES

TUNER, Russel T. Invited review: What do we Know about the effects of space flight on bone? *Journal of Applied. Acta ortop.bras.:vol.12 nº1. São Paulo* 2001. P. 93-106.

VERNIKOS J. Human physiology in space. *Bioessays* 1996; 18:1029 – 37.

WILLIAM S.H., VIEIRA, S. *Metodologia Científica para a Área de Saúde*. Editora Campus, Rio de Janeiro, 2001.

WUBBELS R.J.; SONDAG H.N.P.M.; VAN Marle J.; de Jong H.A.A. **Source:** Brain Research Bulletin, Volume 57, Number 5, 15 March 2002, pp. 677-682(6)  
**Publisher:** Elsevier Science *.Effects of hypergravity on the morphological properties of the vestibular sensory epithelium. I. Long-term exposure of rats after full maturation of the labyrinths.*

WHITE, WILLIAM, J. **A History of the Centrifuge In Aerospace Medicine**. Santa Monica: Douglas Aircraft., 1964, 91p.

Especificações Técnicas AJMaia

[http://www.maia.ind.br/p4742cc\\_201.htm](http://www.maia.ind.br/p4742cc_201.htm)

SHT71 – Datasheet

[http://www.sensirion.com/en/pdf/product\\_information/Data\\_Sheet\\_humidity\\_sensor\\_SHT1x\\_SHT7x\\_E.pdf](http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Data_Sheet_humidity_sensor_SHT1x_SHT7x_E.pdf)

MM33886 – Datasheet

[http://www.freescale.com/files/analog/doc/data\\_sheet/MC33886.pdf](http://www.freescale.com/files/analog/doc/data_sheet/MC33886.pdf)

TRW24G – Datasheet

<http://www.wenshing.com.tw/data/rf-module/TRW-24G.pdf>

NRF2401 – Datasheet

[http://www.nordicsemi.no/index\\_popup.cfm?obj=misc&act=download&pro=64&prop=402](http://www.nordicsemi.no/index_popup.cfm?obj=misc&act=download&pro=64&prop=402)

MSP430f149 – Datasheet

<http://www.ti.com/lit/gpn/msp430f149>

RC164001 YRHB – Datasheet

[http://www.optech.ind.br/produtos/pdf/epg14\\_RC164001YRHB.pdf](http://www.optech.ind.br/produtos/pdf/epg14_RC164001YRHB.pdf)

KMI15/4 – Datasheet

[http://www.nxp.com/acrobat/datasheets/KMI15\\_4\\_4.pdf](http://www.nxp.com/acrobat/datasheets/KMI15_4_4.pdf)