

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SINAIS, SISTEMAS E TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO
LINHA DE PESQUISA: ENGENHARIA BIOMÉDICA

MARCELO JOSÉ ANGHINONI NAVA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CENTRÍFUGA DE ALTA ROTAÇÃO
ELETRONICAMENTE MONITORADA PARA
PESQUISA EM BIOLOGIA ESPACIAL**

Porto Alegre
2012

MARCELO JOSÉ ANGHINONI NAVA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CENTRÍFUGA DE ALTA ROTAÇÃO
ELETRONICAMENTE MONITORADA PARA
PESQUISA EM BIOLOGIA ESPACIAL**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, na área de concentração de Sinais, Sistemas e Tecnologia da Informação.

Orientadora: Dra. Thais Russomano, Ph.D.
Co-orientadora: Dra. Marlise Araújo dos Santos, Ph.D.

Porto Alegre
2012

MARCELO JOSÉ ANGHINONI NAVA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CENTRÍFUGA DE ALTA ROTAÇÃO
ELETRONICAMENTE MONITORADA PARA
PESQUISA EM BIOLOGIA ESPACIAL**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, na área de concentração de Sinais, Sistemas e Tecnologia da Informação.

Aprovada em ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Letícia Maria Bolzani Poehls – PUCRS

Prof. Dr. Eduardo Cassel - PUCRS

Porto Alegre
2012

Dedico o trabalho à minha família.
Em especial, ao meu pai, Enildo
Nava (*in memoriam*), e à minha
mãe, Maria Helena A. Nava.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Thais Russomano, Marlise Araújo dos Santos, Vicente Canali e João Feliz; ao engenheiro Celso Santos e aos alunos Leandro Acácio Esvael e Henrique Lasevitch.

RESUMO

Este trabalho de mestrado tem como principal objetivo o desenvolvimento de um protótipo de uma centrífuga para uso em experimentos com plantas, instrumentalizada e de alto desempenho mecânico. Em mais detalhes, são apresentadas a especificação, implementação, validação e avaliação do desempenho através de um estudo de caso. A alta rotação e estabilidade da centrífuga geram um componente vetorial de força centrífuga, simulando condições de hipergravidade até 15 vezes maior em relação à força de aceleração terrestre. Assim, vegetais submetidos a essa força apresentam seu metabolismo de desenvolvimento modificado. O sistema criado permite o estudo e monitoramento desses padrões de crescimento, demonstrando como as amostras vegetais são influenciadas pelo estímulo induzido. O equipamento desenvolvido possui três níveis de bandejas conectadas a um eixo central, possibilitando a colocação de 36 recipientes de amostras simultaneamente. A centrífuga conta com um sistema de monitoramento remoto de temperatura, umidade e aceleração, cujos dados foram enviados por radiofrequência a uma unidade de processamento. Complementarmente, dois sistemas independentes de filmagem e transmissão de imagens por ondas VHF foram criados para determinar o instante exato de ocorrência das principais fases de crescimento vegetal (como o momento de eclosão de sementes e formação de cotilédones da plântula). Uma vez que esses componentes foram instalados na bandeja superior da centrífuga, sendo submetidos ao movimento rotacional, foi necessário adaptar a alimentação elétrica a partir de uma fonte elétrica externa. Convém mencionar que, de modo a assegurar a transmissão da corrente elétrica entre a parte dinâmica e a estática, foi adotado um conector rotativo de dois pólos. Também foi desenvolvida uma placa reguladora de tensões para distribuir a tensão específica para cada componente fixado na estrutura. Finalmente, a centrífuga foi avaliada através de testes de desempenho e um estudo de caso.

Palavras-chave: Simulação de Hipergravidade. Crescimento de Plantas. Centrífuga. Transmissão de sinais.

ABSTRACT

This work presents the development of an centrifuge prototype for experiments with vegetables. Its main features are the high mechanical performance and instruments. In more details are presented the specification, implementation, validation and performance assessment through a case study. Its high speed and stability generates a vector component of centrifugal force, simulating conditions of hypergravity up to 15 times greater than the acceleration force on Earth. Plants subjected to the force have their metabolism modified. The system allows the study and monitoring of those growth patterns, showing how the samples are influenced by that stimulus induced on plants. The developed device has three levels of trays connected to a central axis, allowing the placement of 36 samples of containers simultaneously. Systems for remote monitoring of temperature, humidity and acceleration were developed and installed, ensuring uniformity of data. The transmission of these data was performed by radiofrequency. In addition, two independent systems of recording and transmission of images through VHF waves were created to determine the exact time of the plant growth stages (such as onset time of seeds and cotyledons formation). Once these components have been installed in the upper tray of the centrifuge, and were subjected to rotational movement, its power supply was provided through an external electrical source. In order to ensure the transmission of electric current between the static and dynamic part, it was employed a rotating two-pole connector. It was also developed a plate voltage regulator to deliver the correct voltage to each component. Finally, it was performed some performance tests and a comparative case study.

Key-words: Hypergravity Simulation. Plants Growth. Centrifuge. Signals Transmission.

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARC - *Ames Research Center*

CAD – *Computer Assisted Design*

CIs – Circuitos Integrados

ELGRA - Associação Européia de Investigação em Baixa e Alta Gravidade

ESA – *European Space Agency*

G-LOC – *Loss of Consciousness*

HyFaBR - *Hypergravity Facility for Biological Research*

ISO - *International Standards Organization*

ISS – *International Space Station*

LEPUC – Laboratório de Eletrônica de Potência da PUCRS

PCIs - Placas de Circuitos Impressos

MCU - Movimento Circular Uniforme

MRU – Movimento Retilíneo Uniforme

NASA - *National Aeronautic and Space Administration*

RF – Radiofrequência

RHT – *Relative Humidity and Temperature*

RPM – Rotações por minuto

VHF – *Very High Frequency*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	17
1.2 Estrutura dos Capítulos	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 Conceitos Físicos gerais	18
2.1.1 Força.....	19
2.1.2 Massa	19
2.1.3 Aceleração.....	20
2.1.4 Força Centrífuga	20
2.1.5 Força Gravitacional.....	21
2.1.6 Peso	22
2.1.7 Peso Aparente	22
2.1.8 Gravidade Reduzida e Gravidade Artificial.....	23
2.1.9 Hipergravidade.....	24
2.1.10 Força G.....	25
2.1.11 Movimento Circular Uniforme (MCU).....	25
2.1.12 Equivalência Frequência de Rotação e Força G	26
2.2 Estado-da-arte: Primeiras Centrífugas	26
2.3 Experimentos com Plantas	30
2.4 Fisiologia Vegetal	31
2.5 Elementos de Projeto de Engenharia	33
2.5.1 Mecânicos	33
2.5.2 Placas de Circuitos Impresso (PCIs).....	34
2.5.3 Transmissão de Dados Digitais	34
2.5.4 Medição de Aceleração	36
2.6 Simulação da Hipergravidade	36
3 PROPOSTA: A CENTRÍFUGA	38
3.1 Primeiro Protótipo	39
3.2 Protótipo Final	41
3.2.1 Componentes estruturais complementares.....	43

3.2.2 Sistema eletromecânico de geração de força	46
3.2.3 Sistema de transmissão de força	47
3.3 Projeto Eletrônico: concepção geral	48
3.3.1 Sistema de captura e transmissão de VHF	49
3.3.2 Sistema de sensoriamento	50
3.3.2.1 Sensor de umidade relativa e temperatura (RHT)	54
3.3.2.2 Acelerômetro	55
3.3.2.3 Xbee	55
3.3.2.4 Programa de computador desenvolvido	55
3.3.3 Sistema de alimentação dos componentes	57
3.3.3.1 Placa reguladora de tensões	58
3.4 Cálculos de dimensionamento de projeto	59
3.4.1 Frequência de rotação e Força G	61
3.4.2 Cálculo das especificações mínimas do motor	64
3.5 Problemas de engenharia	64
4 VALIDAÇÃO	67
4.1 Estudo de caso	67
4.2 Validação de equipamentos	69
4.2.1 Validação da estabilidade do eixo central	69
4.2.2 Validação do sistema de filmagem	71
4.2.3 Validação da transmissão dos sensores	71
5 AVALIAÇÃO	72
5.1 Aspectos Construtivos	72
5.2 Aspectos Eletrônicos e Integração	74
5.2.1 Sensores e Placas	75
5.2.2 <i>Software</i> de Monitoramento	77
5.3 Transmissão de Dados dos Sensores	77
5.4 Sistema de Filmagem	80
5.5 Avaliação da Estabilidade	81
5.6 Estudo de Caso	82
5.6.1 Aplicação do Sistema de Filmagem	85
5.6.2 Comentários Finais	87
6 CONCLUSÕES	88
6.1 Trabalhos Futuros	89

7 REFERÊNCIAS	90
APÊNDICE A – Desenhos técnicos	94
APÊNDICE B - Medições amostrais dos experimentos na Centrífuga V2.....	103
APÊNDICE C – Código do software desenvolvido.....	109

1 INTRODUÇÃO

A união de conhecimentos ligados à área de saúde, engenharia elétrica e outras áreas científicas contribui amplamente para a evolução do entendimento sobre os sistemas biológicos, elevando os padrões de aplicação em benefício humano. Esta dissertação propõe a especificação, implementação, validação e avaliação de uma centrífuga de pequeno porte para pesquisa com plantas.

Ao longo da história da humanidade, o emprego nutricional e farmacológico dos vegetais sempre foi fundamental ao desenvolvimento humano. Com o surgimento da agricultura, a espécie humana deixou de subsistir apenas da coleta e da caça, passando a produzir seus próprios alimentos de maneira mais controlada e eficaz (FIGUEIRA, 2005).

Dentre outros fatores, isso foi decisivo para o surgimento das primeiras civilizações. Ao longo dos séculos, vêm-se buscando o desenvolvimento de vegetais mais nutritivos, maiores e mais resistentes às intempéries ambientais. Com o advento da ciência química, os pesticidas tornaram-se presentes, contribuindo para uma maior produtividade agrícola (WATANABE, NUTTI, 2002). Nas últimas décadas, o avanço da biotecnologia e da engenharia genética resultou na produção de espécies geneticamente modificadas como forma de atingir as mesmas metas. Diminuiu o impacto causado pelos agentes químicos, mas essas técnicas podem causar danos ao ambiente pela destruição da diversidade biológica natural (BRAGA *et al.*, 2004).

Atualmente, porém, o grande desafio é o desenvolvimento de uma agricultura sustentável e ecológica, impedindo qualquer possível dano ao equilíbrio natural (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2009).

Em anos recentes, a *National Aeronautic and Space Administration* (NASA) tem realizado esforços para entender a influência do espectro de forças gravitacionais sobre o desenvolvimento dos seres vivos. Para isso, são realizados testes durante as missões espaciais (microgravidade) e também em terra, em centrífugas de pequeno porte (hipergravidade) (SMITH, 2011). A partir desse conhecimento, a humanidade passou a empregar uma força física da natureza (aceleração centrífuga) como princípio para manipulação vegetal, alternativamente à adição de substâncias químicas e modificações genéticas. Nasceu, assim, uma nova área de pesquisa.

O *Ames Research Center* (ARC), da NASA, tem sido responsável por estudos de hipergravidade simulada em terra, objetivando a compreensão de como as plantas reagem (morfologicamente e a nível celular) aos efeitos de um espectro de diferentes gradientes de

gravidade. Esses estudos vêm complementando as investigações realizadas em microgravidade na Estação Espacial Internacional (ISS), para o futuro cultivo de alimentos no espaço. O ARC utiliza centrífugas especialmente projetadas para estudos com culturas celulares e plantas. O equipamento *Hypergravity Facility for Biological Research* (HyFaBR), estado-da-arte, foi construído a partir de uma centrífuga humana desativada. Possui um braço de 2,74 m de comprimento e é acionada por um motor de 20 HP de potência. Foi integrado um sistema para monitoramento rigoroso de atmosfera, com controle do nível de CO₂ e sistemas para coletas de dados e filmagens do crescimento celular. Permite pesquisas de longa duração, com programa automático de controle de protocolo de pesquisa. Atinge um máximo de +12Gz (figura 1). A última geração de centrífugas de plantas de pequeno porte (raio máximo de 0,50 m) do ARC permite a geração de até +25G_z, com medições de temperatura, umidade e atmosfera controlada (NASA, 2010). Porém, não há um circuito de transmissão de TV específico para monitorar, integralmente, o crescimento vegetal.

Figura 1 - Centrífuga *HyFaBR* para estudos com hipergravidade em plantas



Fonte: NASA (2010).

O Centro de Tecnologia da *European Space Agency* (ESA), localizado na Holanda, também possui uma centrífuga específica para testes com elementos não-humanos (figura 2). A pesquisa é realizada em parceria com a Associação Europeia de Investigação em Baixa e Alta Gravidade (ELGRA). Dentre as principais pesquisas, destacam-se a investigação dos efeitos da gravidade sobre o tratamento superficial de materiais metálicos; o efeito da

hipergravidade sobre o comportamento de uma gota de líquido em contato com uma superfície plana e sólida; e a influência da hipergravidade sobre o desenvolvimento dos diferentes sistemas e órgãos vegetais (COWING, 2011).

Figura 2 – Detalhe da centrífuga empregada pelas pesquisas da ESA



Fonte: Cowing (2011).

A Universidade de Moscou vem realizando testes de centrifugação com plantas há uma década. Recentemente, alunos projetaram uma centrífuga de pequeno porte de baixo custo, revelando-se como uma boa alternativa para ensaios laboratoriais. A figura 3 apresenta o protótipo do equipamento. O projeto seguiu a mesma concepção do modelo empregado pela ESA, ou seja, pequenos containers (onde são colocadas as amostras de plantas e pequenos animais) acoplados a diversos “braços” presos ao eixo central.

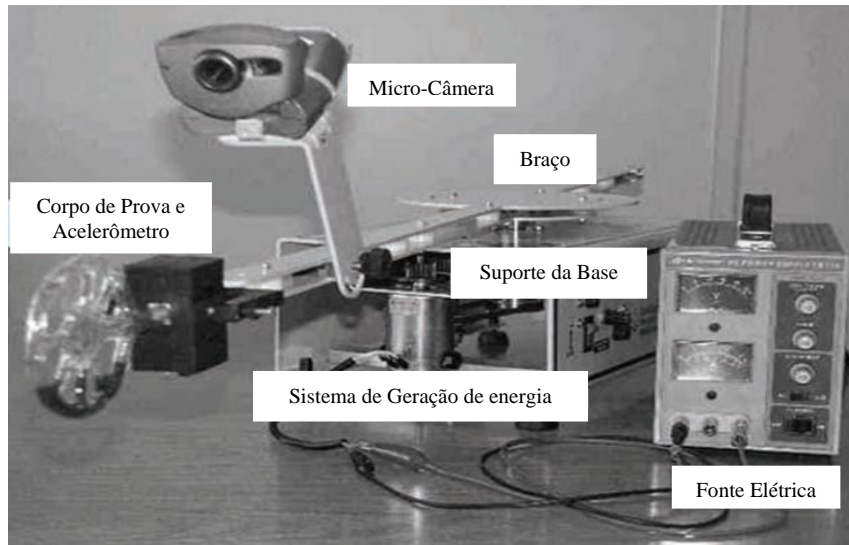
Figura 3 – Protótipo de centrífuga de baixo custo desenvolvido pela Universidade de Moscou



Fonte: Shender *et al.* (2003).

O Centro de Microgravidade da PUCRS vem realizando pesquisas em hipergravidade desde 2004, com a construção da primeira centrífuga. Ela foi usada para fins educacionais, demonstrando o efeito da força centrífuga sobre a fisiologia humana, através de simulações. Também possuía um sistema básico de filmagem (AZEVEDO, *et al.*, 2004). A figura 4 apresenta esse primeiro desenvolvimento.

Figura 4 - Primeira centrífuga do Centro de Microgravidade



Centrífuga com propósitos educacionais para demonstrações dos efeitos fisiológicas da força G.
Fonte: Azevedo, *et al.* (2004).

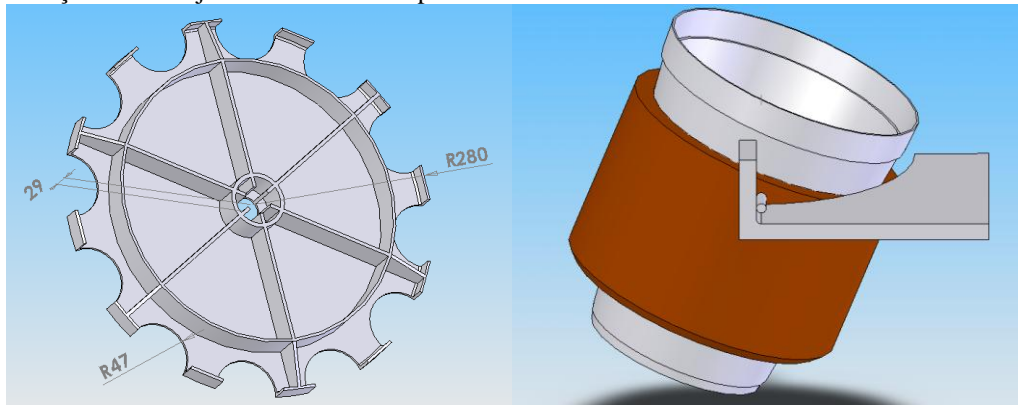
Posteriormente, foi desenvolvido o primeiro protótipo de uma centrífuga para estudos com plantas, através da criação de uma estrutura horizontal, um “braço” mecânico, que foi acoplada ao eixo central de um motor. Foi criado, também, um sistema básico de comunicação e monitoramento, por meio da instalação de sensores (ROSA, 2005).

Nos anos seguintes, essa centrífuga foi totalmente remodelada, ganhando uma estrutura de bandejas e suportes especiais para acoplar um número maior de amostras (esse equipamento receberá, nesse trabalho, a denominação *Centrífuga V1*). Ele possibilitou estudos preliminares que resultaram em uma patente internacional do processo de crescimento de plantas sob influência de hipergravidade simulada (US 2010/0180499 A1) (RUSSOMANO, *et al.*, 2010).

Produzida em PVC, a Centrífuga V1 do Centro de Microgravidade apresenta nervuras para aumentar a resistência mecânica. Com bandejas sobrepostas formando três níveis (diâmetro externo de 560 mm), comporta até 36 suportes de amostras por vez. Em funcionamento, porém, a estrutura apresenta grande instabilidade, inviabilizando o uso de todos os suportes.

Os suportes de amostras, por sua vez, foram produzidos em poliéster. Esse material possui resistência mecânica suficiente para que suporte os níveis de aceleração exigidos durante as sessões de hipergravidade. Porém, após sucessivas sessões, tem apresentado fadiga, comprometendo a segurança. O encaixe dos suportes de amostras é realizado pela colocação dos mesmos nos vãos semicirculares existentes nas bandejas. O equipamento atinge um máximo de 137 rpm (rotações por minuto) simulando, através da força centrífuga resultante, uma hipergravidade de +7Gz. A figura 5 apresenta o *design* da estrutura mecânica, produzidas através do *software* de CAD *Solid Works*, versão 2007.

Figura 5 – Ilustração da bandeja e do sistema de suporte de amostras



Fonte: o autor (2012).

A Figura 6 apresenta a Centrífuga V1 construída e empregada na primeira fase de experimentos com plantas no Centro de Microgravidade.

Figura 6 – Estrutura da Centrífuga V1



Fonte: o autor (2012).

A *Eruca sativa* Mill. (rúcula), um vegetal superior da família das angiospermas dicotiledôneas, foi a planta modelo empregada para a avaliação dos efeitos da hipergravidade simulada sobre os vegetais, em função de sua rápida resposta à ação da hipergravidade e facilidade de manejo. Resultados têm demonstrado significativa aceleração em seu desenvolvimento (em relação às amostras que não foram submetidas à hipergravidade), principalmente da raiz (RUSSOMANO *et al.*, 2007).

Em alguns vegetais, a parte de maior interesse são as folhas, por conter substâncias medicinais; em outras espécies, a raiz, por conter betacaroteno, torna-se fundamental, como no caso da cenoura (*Daucus carota* L. cv. Nantes).

Oficialmente criado em 2009, o Laboratório de Farmácia Aeroespacial “Joan Vernikos”, pertencente ao Centro de Microgravidade, coordena as pesquisas nessa área. Para possibilitar a ampliação das investigações científicas em hipergravidade, torna-se fundamental o desenvolvimento de uma centrífuga com maior precisão mecânica e um novo sistema de instrumentação eletrônica.

Assim, a nova centrífuga garantirá a obtenção de mais informações sobre o processo de crescimento de plantas em hipergravidade. Além disso, é relevante sua contribuição sócio-ambiental, na medida em que tornará a produção de alimentos e fármacos (oriundos das plantas) mais segura, econômica e ecologicamente sustentável (sem uso de aditivos químicos e manipulação biológica).

Neste contexto, este trabalho aborda o desenvolvimento de um protótipo de uma centrífuga para fins acadêmicos, sem paralelo comercial. Em mais detalhes, este trabalho apresenta a especificação, implementação, validação e avaliação de uma nova centrífuga para o Centro de Microgravidade (denominada de *Centrífuga V2*), com alto desempenho mecânico e adição de instrumentação eletrônica, em relação à Centrífuga V1. Em relação à centrífuga HyFaBR, da NASA, a centrífuga proposta permite o monitoramento completo do crescimento vegetal, através de um circuito interno de TV. Esse sistema mostra em detalhes o exato instante em que ocorrem as principais etapas do desenvolvimento vegetal, revelando a influência da hipergravidade sobre o vegetal analisado.

O processo de especificação e implementação da centrífuga (evolução do *design* do protótipo, a seleção dos materiais, o processo de fabricação, a integração entre as partes mecânica, elétrica e eletrônica), a metodologia adotada na validação e na avaliação são descritas em detalhes nos capítulos subsequentes.

1.1 Objetivos

A meta fundamental é o desenvolvimento de uma nova centrífuga, denominada Centrífuga V2. Dentre os objetivos específicos, pode-se citar:

- *Design*, em CAD, de uma centrífuga com nova estrutura mecânica;
- Pesquisa e seleção de materiais estruturais e componentes eletro-eletrônicos, levando-se em conta fatores como resistência mecânica, densidade, durabilidade e economia;
- Construção das peças estruturais e do sistema de transmissão de força;
- Geração de potência acima de 53 W (preferencialmente até 100 W) para realização de experimentos a $+15G_z$;
- Instalação de um sensor de temperatura e umidade (RHT), um sensor de aceleração e um conector rotativo;
- Projeto e produção de um circuito eletrônico para regulação de tensões;
- Implementação de um sistema para transmissão e recepção dos dados dos sensores, via ondas de radiofrequência (RF);
- Criação de um *software* para apresentação e registro dos dados dos sensores;
- Implementação de um sistema de TV (em duplicata) para captação, transmissão, recepção e digitalização de *very high frequencies* (VHF);
- Integração entre os sistemas mecano-eletro-eletrônicos;
- Testes para comprovação do desempenho (correto funcionamento) por meio da análise da estabilidade e um estudo de caso em uma situação prática.

1.2 Estrutura dos Capítulos

Esta dissertação apresenta a seguinte estruturação: um capítulo de fundamentação teórica, para demonstração dos principais conceitos físicos, de engenharia, de fisiologia vegetal, das pesquisas com plantas e um histórico do desenvolvimento das centrífugas.

Na sequência, a parte da metodologia divide-se em dois capítulos distintos: um deles aborda a proposta do trabalho, tratando das especificações, o processo de implementação da centrífuga e os problemas de engenharia solucionados; o outro é voltado para a validação empregada como forma de comprovação do desempenho. O capítulo subsequente apresenta o processo de avaliação da centrífuga, onde são apresentados os resultados e as discussões. Por fim, o último capítulo traz as conclusões finais.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo destaca os principais conceitos físicos relevantes para a especificação e implementação da centrífuga. Complementarmente, enfoca também um breve histórico sobre a evolução das centrífugas e alguns tópicos fundamentais sobre a fisiologia vegetal e projetos em engenharia. A grande interdisciplinaridade do trabalho pode ser, assim, melhor compreendida.

2.1 Conceitos Físicos Gerais

Para melhor entendimento sobre o funcionamento básico do equipamento, é importante saber que, quando uma partícula é forçada a descrever uma trajetória circular (assumindo, portanto, uma determinada velocidade angular), uma força é exercida na partícula de modo a tentar fazê-la continuar em trajetória retilínea. Temos, assim, a *força centrífuga*, que é uma pseudoforça ou força inercial (não sendo, portanto, uma força real) que existe apenas para um observador em relação a um referencial inercial, ou seja, sem aceleração. A (pseudo) força centrífuga atua radialmente a partir do centro de rotação determinado pela partícula no sistema girante, ou seja, é paralela ao plano determinado pelo eixo de rotação, mais especificamente pelo vetor velocidade angular ω e pelo raio r que une o objeto ao centro do referencial girante, sendo sempre perpendicular a este eixo de rotação. Como toda força inercial, pode ser eliminada passando-se a um referencial inercial (TIPLER e MOSCA, 2006). Essa força produz uma *aceleração centrífuga* (ac), cuja intensidade aumenta com o quadrado da velocidade angular, sendo diretamente proporcional ao raio da circunferência, conforme a equação 1.

$$ac = \omega^2 \cdot r \tag{1}$$

ω é a velocidade angular descrita pela partícula [rad/s] e r é o raio formado pela sua trajetória circular [m].

Outro conceito importante é o *centro de gravidade*. Na mecânica clássica, o *centro de gravidade* ou *baricentro* de um corpo é o ponto onde ocorre a concentração da força de gravidade de todo o corpo formado por um conjunto de partículas. Essas partículas são atraídas para o centro da Terra, cada qual com sua força peso. Centro de gravidade, portanto,

é o ponto onde pode-se equilibrar todas essas forças de atração. *Centro de massa*, por outro lado, é o ponto onde toda sua massa está concentrada para o cálculo de vários efeitos (TIPLER e MOSCA, 2006).

Outro importante conceito é o momento de inércia (equação 2), que representa a distribuição da massa de um corpo em torno de um eixo de rotação. Quanto maior for o momento de inércia de um corpo, mais difícil será fazê-lo girar.

$$I = (m.d^2) / 12 \quad (2)$$

I é o momento de inércia [Kg.m^2], m é a massa [kg] e d é o diâmetro [m].

O torque, capacidade de uma força em produzir rotação em um corpo, é dado pela equação 3.

$$T = \frac{I}{t_a} \varpi \quad (3)$$

T é o torque [N.m] e t_a é o tempo [s].

Por fim, a potência mecânica é dada pela equação 4.

$$P = T.\varpi \quad (4)$$

P é a potência [W].

Na sequência, são apresentadas as definições de outros conceitos físicos relevantes.

2.1.1 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). A direção resultante da força é a direção da aceleração que a mesma produz em um determinado corpo.

2.1.2 Massa

Representa a quantidade de matéria de um corpo, e conceitualmente apresenta duas classificações: massa gravitacional e massa inercial (ALONSO e FINN, 1992). A massa

gravitacional de um corpo é aquela responsável pela força de atração de natureza gravitacional que ele exerce sobre um corpo. Já a massa inercial de um corpo pode ser conceituada como a sua resistência à aceleração. 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 (BEER e JOHNSTON, 1991).

2.1.3 Aceleração

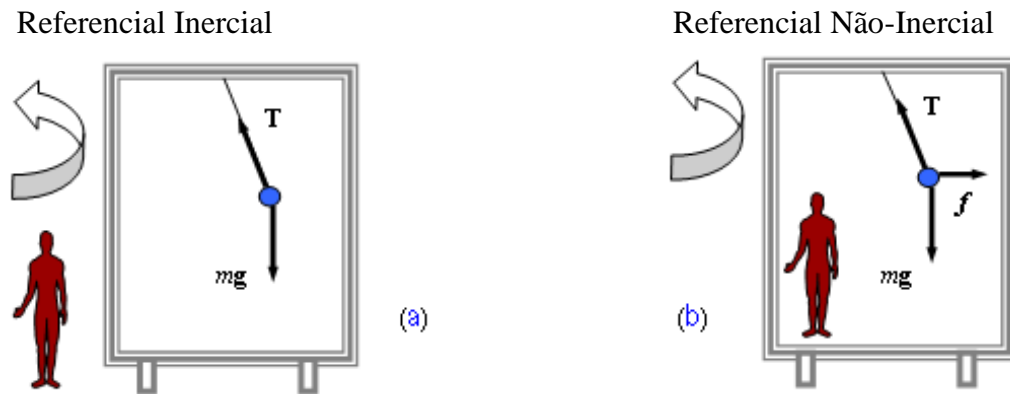
A grandeza que atrai com a mesma intensidade dois corpos quaisquer, independentemente da quantidade de massa que estes possuam é chamada de aceleração.

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).

2.1.4 Força Centrífuga

O conceito de *força centrífuga*, caso especial de *força inercial*, pode ser entendido com o auxílio da figura 7, que descreve uma curva para a esquerda, em movimento circular uniforme (MCU). Ela 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 . 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, como sendo 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* (RESNICK, 1991).

Figura 7 – Representação esquemática de um vagão de trem



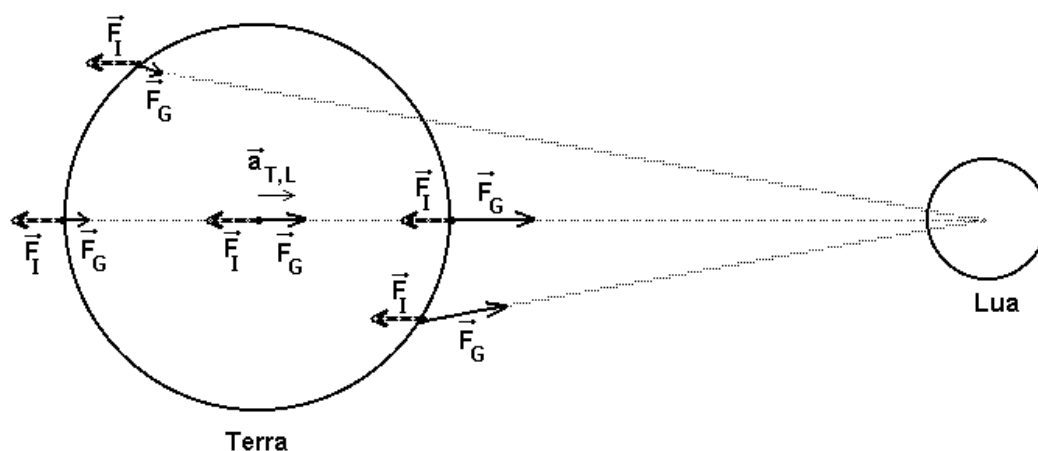
(a) representa um observador inercial, em relação ao solo, observando a esfera fazer a curva, junto com o vagão, com uma aceleração centrípeta dada pela componente horizontal de T; (b) representa um observador dentro do vagão, que sofre a mesma aceleração deste. Nesse caso, a esfera está em equilíbrio e, por isso, existe uma força fictícia f que equilibra a componente horizontal de T.

Fonte: Resnick (1991).

2.1.5 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, conforme mostrado na Figura 8 (SERWAY,1992).

Figura 8 – Efeito da força gravitacional sobre astros celestes



Fonte: Maximo e Alvarenga (2000).

2.1.6 Peso

Peso é a força produzida por uma aceleração de origem gravitacional sobre uma massa qualquer. O peso é a produto da massa multiplicada pela aceleração gravitacional, conforme consta na equação 5.

$$W = m.g \quad (5)$$

W é o peso [N] e g é o valor da aceleração gravitacional [m/s^2].

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 (WUBBELS, *et al.*, 2002). 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. Assim, o peso de uma pessoa no topo de uma montanha é menor do que na base da mesma (VERNIKOS, 1996).

2.1.7 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). Na medida em 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 ($g = 9.81m/s^2$) tornando seu peso maior do que quando estava inerte em solo terrestre (BEER e JOHNSTON, 1991).

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. 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. O módulo da força centrífuga pode ser calculado através da equação 6, uma vez que a diferença entre a força centrípeta e a centrífuga está apenas no referencial.

$$Wa^2 = W^2 + Fcg^2 \quad (6)$$

Wa é o peso aparente [N] e Fcg é a força centrífuga [N].

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.

A equação 7, descrita abaixo, é útil para o cálculo da força centrípeta [N].

$$Fcp = m.\omega^2.r \quad (7)$$

m representa a massa do corpo de prova [kg], ω é a velocidade angular [rad/s] e r é o raio da curva [m] que, no caso da centrífuga, é a distância que um determinado corpo de prova se encontra em relação o centro de rotação.

Quando um objeto em MCU 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 Isaac Newton (VERNIKOS, 1996).

Caso este mesmo objeto 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 7, 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).

2.1.8 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 Newton foi apoiada no estudo de Johannes Kepler, 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 aceleração gravitacional que atua sobre um ônibus espacial em órbita é de aproximadamente $8,8\text{ m/s}^2$ (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 orbita 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 voos 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, 2003).

2.1.9 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 a aceleração gravitacional (g), ele é considerado, para efeito de cálculo, como estando submetido a uma força gravitacional maior que a força gravitacional terrestre. As forças que geram ambientes de hipergravidade e que são encontradas durante voo 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 voo de trajetória circular, a força centrípeta é a própria força de sustentação gerada pelas asas das aeronaves. Em voos 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 (TIPLER e MOSCA, 2006).

2.1.10 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 (BEER, JOHNSTON, 1991).

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 W_a corresponde a uma força de 2G, logo, uma força equivalente a duas vezes a da gravidade terrestre. Neste caso, a força é referida como 2G, onde G é a quantificação da força resultante em números de força gravitacional terrestre. O destaque mostrado na figura 9 apresenta a convenção dos respectivos eixos, bem como o sentido de aplicação da força (indicado por um sinal de + ou de -).

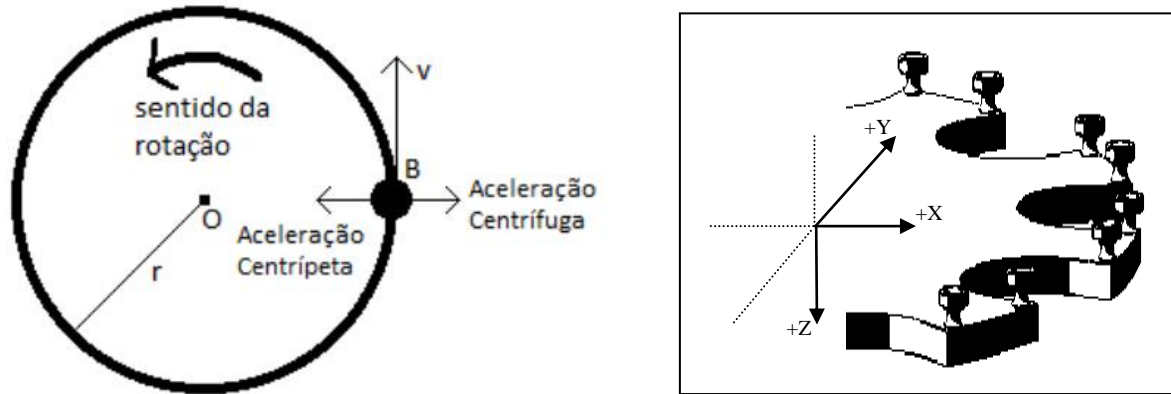
2.1.11 Movimento Circular Uniforme (MCU)

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 9 mostra um objeto em MCU em três momentos

diferentes. Embora o módulo da velocidade seja igual nos três instantes, a direção muda constantemente devido à aceleração centrípeta.

Figura 9 – Representação das direções e módulos de aceleração durante MCU



O destaque apresentado à direita apresenta a convenção do sistema de eixos adotada. A figura à esquerda está localizada, portanto, no plano formado pelos eixos Y e X.

Fonte: Projeto Educar (2002).

2.1.12 Equivalência entre frequência de rotação e Força G

Em alguns casos, é desejável conhecer o valor equivalente em Força G a partir do valor conhecido da frequência de rotação, que é expressa em rpm (rotações por minuto). Através da equação 8, essa conversão é possível.

$$FG = \frac{\sqrt{g^2 + \omega^4 \cdot r^2}}{g} \quad (8)$$

FG é a equivalência em números de força gravitacional, g equivale à aceleração da gravidade em m/s^2 e r é a distância que o corpo de prova se encontra em relação ao centro de rotação da centrífuga [m].

2.2 Estado-da-arte: Primeiras Centrífugas

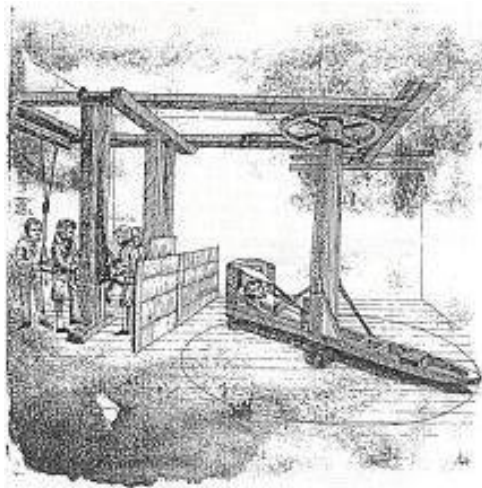
Centrífugas são equipamentos que aplicam a força centrífuga relativa em determinado objeto através da rotação do mesmo em torno de um eixo. É um instrumento capaz de criar uma aceleração sobre o corpo, através de movimentos circulares. Desta maneira, simula-se uma força centrípeta que puxará o corpo em questão para dentro da curva, e uma força

centrífuga, que puxará o corpo para fora. O equilíbrio destas forças resulta em um movimento circular e uniforme.

O estudo do efeito provocado por centrífugas nos seres vivos teve início no século XIX. Naquela época, centrífugas rudimentares (na verdade, máquinas giratórias para moer milho), estavam sendo empregadas para tratamentos psiquiátricos. Posteriormente, durante a Segunda Guerra Mundial, iniciou-se o desenvolvimento de centrífugas maiores e mais complexas para o treinamento militar de pilotos. Atualmente, as mais desenvolvidas são usadas por agências espaciais como parte do treinamento de astronautas (ROSA, 2007).

As primeiras centrífugas surgiram para fins medicinais. 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 falecer caso o movimento fosse prolongado. Este caso foi relatado por Erasmus Darwin na sua publicação *Zoonomia*, especificando que o efeito 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 (figura 10) (WHITE, 1964).

Figura 10 – Centrífuga usada para tratamento de histeria

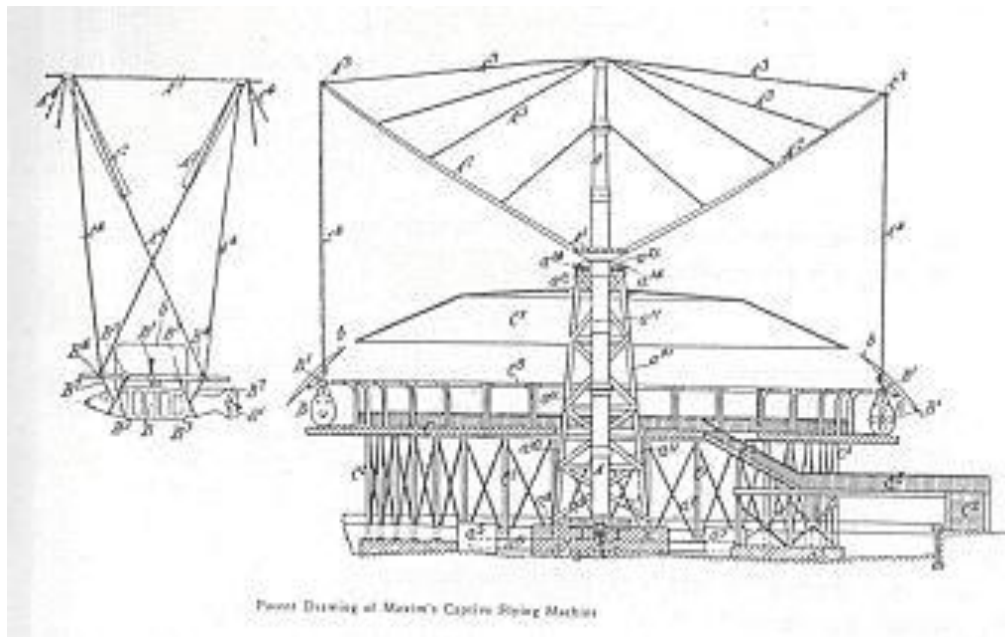


Fonte: White (1964).

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. 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 +10,5Gz 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 (WHITE, 1964).

Figura 11 – Desenho técnico de uma máquina de um parque de diversões



Fonte: White (1964).

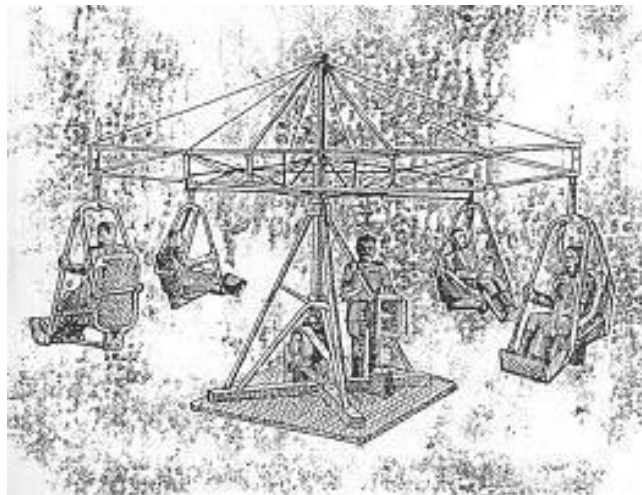
A força centrífuga é capaz de produzir um aumento da força da gravidade atuante em um determinado corpo de prova. Nos casos de Sir Maxim e do piloto Luke Christopher, experimentaram um aumento da força gravitacional no eixo corporal Z (Força +Gz), que os levou a um estado de desmaio. Na medida em que a Força G foi reduzindo e chegando perto da força que é experimentada diariamente sem se estar em uma centrífuga de prova, eles recobram a consciência. O efeito causado por esta Força G, descrita nos indivíduos citados, alterou a distribuição sanguínea em seus corpos, causados especificamente pela Força +Gz.

Em 1935, entrou em operação a primeira centrífuga humana da América do Norte, em Wright Field, Ohio, com 7 m de diâmetro. Na extremidade do braço havia um assento que podia ser fixado em qualquer um dos eixos ($\pm Z$, $\pm X$ ou $\pm Y$). Sua frequência máxima de rotação atingia 80 rpm e podia criar uma força de até +20Gz (WHITE, 1964).

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 1939 marcou o registro da construção da primeira centrífuga humana do Japão. Possuía um raio de 8 m e demorava um minuto para alcançar a velocidade necessária para produzir +5Gz. Foi raramente usada, principalmente após um voluntário 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 3 m, foi brevemente usada, até ser destruída por um bombardeio aéreo durante a segunda guerra mundial.

Atualmente, as centrífugas são empregadas também para fins militares, de modo a treinar o corpo humano e torná-lo mais resistente à Força G, sendo muito úteis para a simulação do aumento da força gravitacional. Em 1939, na Inglaterra, foi iniciado o treinamento de pilotos com a centrífuga da figura 12, usada para aumentar a resistência do corpo humano perante à Força G.

Figura 12 – Centrífuga de teste de pilotos



Fonte: White (1964).

Em 1942, o exército japonês instalou uma nova centrífuga em Tachikawa. No primeiro ano de operação, aproximadamente 3000 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 possuía 9 m de raio, sendo que cada braço sustentava uma gôndola que podia ser usada simultaneamente, podendo alcançar uma força de +30Gz, com implemento de +7G/s (WHITE, 1964).

2.3 Experimentos com Plantas

Centrífugas de pequeno porte foram aplicadas, inicialmente, para a separação de diferentes fases de uma mistura química. Também foram criadas ultracentrífugas, cujos rotores permitem acelerações de até +500Gx para estudos em biotecnologia (KARP, 2005).

Com relação aos estudos em plantas, descobriu-se que a hipergravidade estimula, a nível celular, a formação de lignina e a ação da enzima peroxidase em feijões japoneses (*Vigna angularis*). Esse estímulo cria, como consequência, uma parede celular reforçada como resposta adaptativa da célula à ação da hipergravidade (WAKABAYASHI, *et al.*, 2009).

Uma pesquisa complementar comprovou essa resposta adaptativa em sementes de orégano (CHEN e SIEGEL, 1980). Em sementes de arroz, percebeu-se a formação de raízes maiores e mais espessas. Porém, a hipergravidade mostrou-se prejudicial à formação de clorofila (VIDYASAGAR, 2008). Com o radite (*Raphanus sativus* L.) ocorreu redução no seu comprimento total, mas houve um aumento da espessura de seu caule e raiz e, principalmente, uma maior formação dos componentes que formam a parede celular (KASAHARA, 1995).

Outro estudo, com centrifugação de sementes a até +300Gz, pesquisou como determinados genes se manifestam em ultracentrifugações, mostrando que genes que codificam hormônios são os mais estimulados (TAMAOKI, 2009).

Investigações realizadas com *Eruca Sativa* Mill. demonstraram que as sementes expostas a +7Gz germinaram em três dias enquanto que, as de controle, que não sofreram estímulo hipergravitacional, necessitaram de quatro. Além disso, aquelas apresentaram crescimento médio (na parte aérea) de 2,2 cm contra 1,9 cm das amostras do controle (RUSSOMANO *et. al.*, 2007). Porém, a região de maior interesse comercial dessa planta são as folhas, tanto por seu valor nutricional (Ferro e vitaminas A e C), quanto pelo óleo essencial extraído (usado na indústria química e na medicina).

Outro interessante estudo realizado por pesquisadores da NASA consistiu na avaliação sobre como sementes de *Arabidopsis* “percebem” a força da gravidade (gravipercepção).

Esses experimentos de 9 dias de duração foram conduzidos a bordo do ônibus espacial durante a missão STS-84, em 1997. Antes do lançamento, as sementes foram semeadas em 28 mini-containers e posteriormente colocadas na Incubadora Biorack a 22 °C (figura 13). Após 24 horas, as sementes foram colocadas no porta-luvas Biorack e estimulado pela luz por 14 horas. Cinquenta horas depois de iluminação, os recipientes foram transferidas para uma centrífuga de +1Gz, acoplada ao Biorack, por 5 minutos. O procedimento foi repetido com diferentes conjuntos de recipientes para 10, 20 e 60 minutos. Os restantes seis recipientes foram deixados em ambiente de microgravidade constante. As mudas foram filmadas a cada 60 ou 120 minutos de intervalo durante 240 minutos. As plântulas de *Arabidopsis* apresentaram a maior magnitude de curvatura após 90 minutos de estímulo com +1Gz. Estes dados, em que quantidades crescentes de amido presentes na semente influenciaram positivamente o aumento da sensibilidade à gravidade. Além disso, as plantas mostraram um maior número de pêlos radiculares e uma estrutura de ganchos anômalas no caule. No entanto, essas mudanças estruturais podem estar relacionadas aos efeitos dos níveis elevados de etileno presentes na atmosfera da nave (KISS e FITZELE, 2001).

Figura 13 – Astronautas-cientistas da NASA manipulando os mini-containers do *Biorack* durante teste de gravipercepção em plantas



Fonte: Kiss *et al.* (2002).

2.4 Fisiologia Vegetal

Os fitormônios, como também são chamados os hormônios vegetais, são substâncias orgânicas atuantes nos diferentes órgãos das plantas: raiz, caule, folhas, flores e frutos, responsáveis pelo crescimento e desenvolvimento do vegetal. Os hormônios são sintetizados

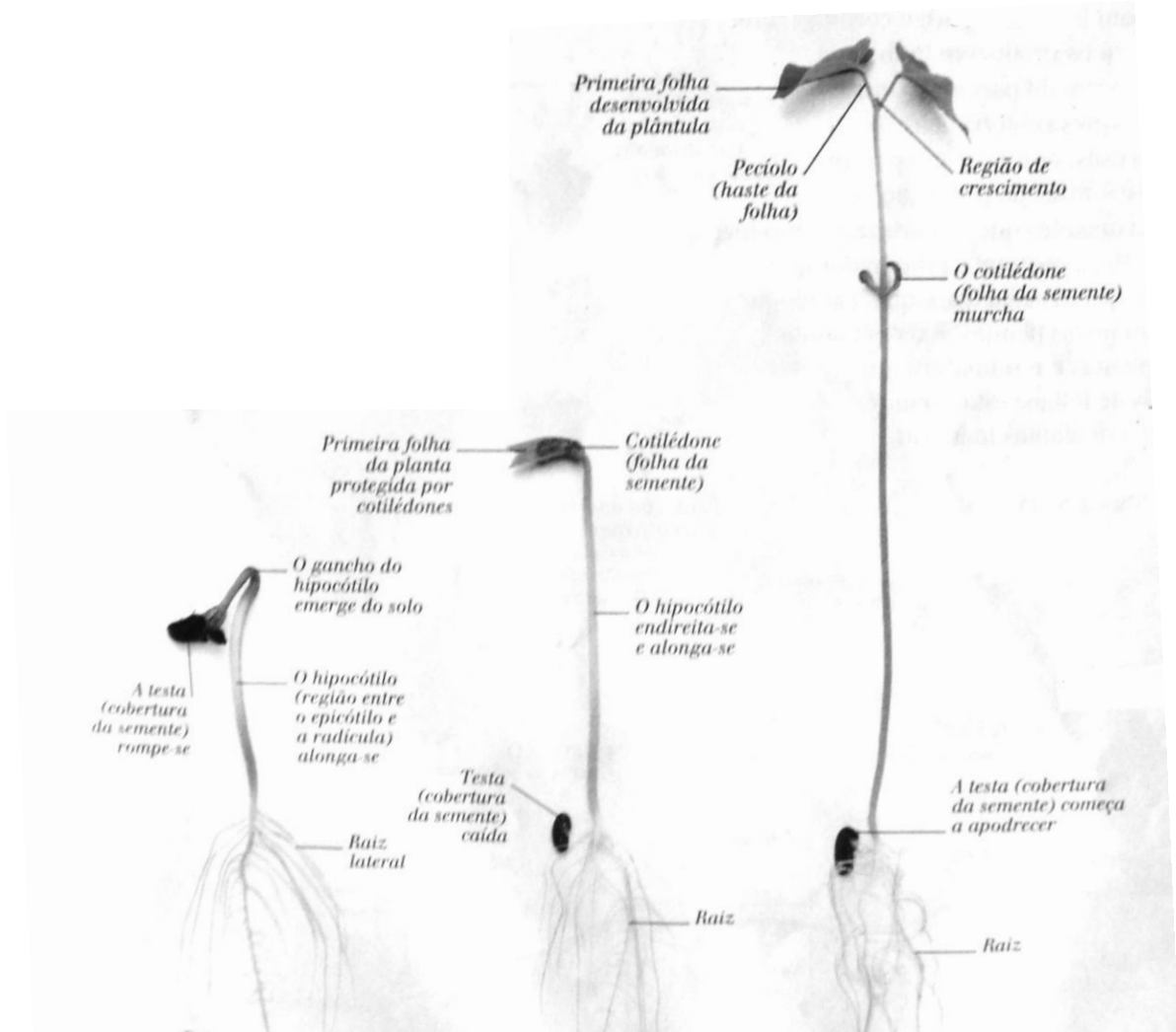
em pequenas frações, com função direcionada a locais específicos. A produção hormonal pode, conforme a espécie vegetal, obedecer indiretamente os fatores climáticos, sendo observável à medida que sucedem as estações sazonais do ano. Fatores como: intensidade luminosa, temperatura, umidade e concentração de gases, influenciam na formação e amadurecimento dos frutos, abscisão foliar (queda das folhas), floração e crescimento do caule e da raiz por alongamento celular. Entre as categorias de hormônios vegetais, relacionados à divisão celular, crescimento e diferenciação, destaca-se: as auxinas (ácido indolacético), giberelinas, etileno, ácido abscísico e citocininas (LINCOLN, 2006).

As auxinas são responsáveis pelos tropismos (foto e geotropismo), desenvolvimento dos frutos, alongamento celular radicular e caulinar. Esse fitormônio é produzido no meristema apical do caule, primórdios foliares, flores, frutos e sementes. Transportado pela extensão do vegetal através dos vasos xilema e floema (BOTKIN e KELLER, 2006).

O geotropismo (ou gravitropismo) é o crescimento de um órgão vegetal resultante do efeito da gravidade. É positivo quando segue a direção da gravidade (crescimento das raízes) e negativo quando é oposto (crescimento dos ramos). Assim, as zonas do caule e da raiz voltadas para baixo recebem maior quantidade de auxinas do que as zonas superiores. A elevada concentração de auxinas favorece o crescimento do caule e inibe o crescimento da raiz. Em consequência, a região do caule voltada para baixo alonga-se mais rapidamente que a região superior. Diz-se que o caule tem gravitropismo negativo (-). No caso da raiz, a zona inferior cresce mais lentamente que a zona superior, o que faz com que nesse órgão apareça uma curva de crescimento dirigida para baixo, designando-se este tipo de movimento por gravitropismo positivo (+) (LINCOLN, 2006).

A figura 14 apresenta os principais componentes anatômicos de uma plântula em crescimento.

Figura 14 – Anatomia básica da plântula e etapas de desenvolvimento



Fonte: Kindersley (1993).

2.5 Elementos de projetos de engenharia: definições gerais

A seguir, são apresentados os principais conceitos e definições relacionados aos fundamentos de engenharia mais relevantes empregados no desenvolvimento da centrífuga.

2.5.1 Mecânicos

Eixos de rotação, ou simplesmente eixos, são usados em praticamente todas as partes de máquinas rotativas para transmitir movimento de rotação e torque de uma posição à outra. A fim de minimizar as deflexões, o aço é a melhor escolha para o material do eixo devido ao seu elevado módulo de elasticidade. Para melhorar a eficiência de transmissão de torque, o eixo pode apresentar uma chaveta (peça que mantém fixa a polia na extremidade de um eixo,

podendo apresentar perfil retangular ou circular). Rolamentos são peças fundamentais em máquinas giratórias para guiar o movimento de rotação. Sua característica principal é minimizar o atrito de deslizamento entre as superfícies do eixo, a fim de reduzir as perdas de energia (SHIGLEY, *et al.*, 2004).

Uma *polia* é uma roda lisa ou sulcada em sua periferia, fixa num eixo rotatório e acionada por uma correia. É utilizada para transferir movimento e energia. Correia corresponde a uma cinta de material flexível, normalmente feita de camadas de lonas e borracha vulcanizada, que serve para transmitir a força e movimento de uma polia a outra. Motoredutor é a integração entre um motor elétrico (dispositivo que converte energia elétrica em movimento mecânico) e um redutor (elemento capaz de reduzir a frequência de rotação de um motor, ajustando para determinado fim e, conseqüentemente, impondo maior força para determinadas aplicações) (NORTON, 2000).

2.5.2 Placas de Circuitos Impresso (PCIs)

Placas de Circuitos Impresso (PCIs) são amplamente empregadas em todos os tipos de equipamentos eletrônicos, principalmente quando se empregam em sua construção circuitos integrados (CIs). Consistem de uma placa de fenolite, fibra de vidro, fibra de poliéster, filme de poliéster ou filmes específicos à base de diversos polímeros, que possuem a superfície coberta numa ou nas duas faces por uma fina película de cobre, prata, ou ligas à base de ouro, níquel entre outras, por um processo de impressão eletroquímica, chamado galvanoplastia, nas quais são desenhadas trilhas condutoras que representam o circuito onde serão fixados os componentes eletrônicos. Dentre os principais atributos ao projeto de uma PCI, tem-se: determinação das possíveis restrições em locais específicos da placa; verificação das dimensões dos componentes eletrônicos que serão usados e verificação das condições especiais do circuito, tais como tensões ou correntes muito altas, que requerem cuidados no espaçamento entre as trilhas (ALEXANDER e SADIKI, 2003).

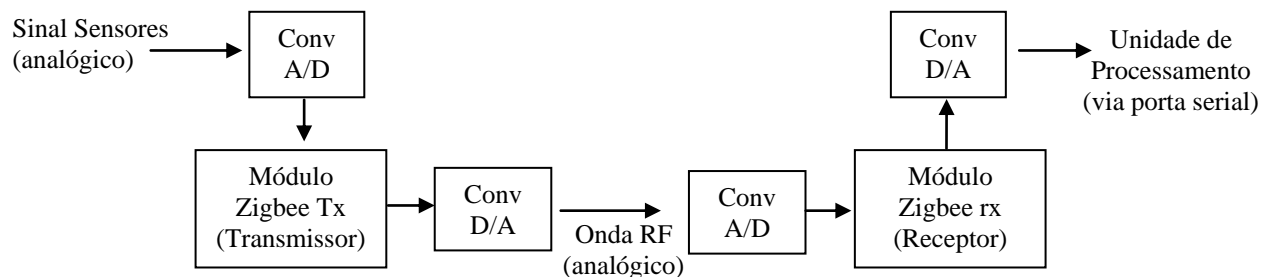
2.5.3 Transmissão de dados digitais

A transmissão de radiofrequência, também chamada de ondas de rádio ou simplesmente RF, usando-se tecnologia *ZigBee*, designa um conjunto de especificações para a comunicação sem-fio entre dispositivos eletrônicos. Possui ênfase na baixa potência de consumo, na baixa taxa de transmissão de dados e no baixo custo de implantação.

Diferencia-se das redes *Wi-Fi* e *Bluetooth* por desenvolver menor consumo, pelo reduzido alcance e pelo fato de que as comunicações entre os dois módulos pode ser repetida sucessivamente pelas unidades existentes na rede até atingir o destino final. Funcionando todos os pontos da rede como retransmissores de informação, uma malha (*Mesh*) de unidades *ZigBee* pode realizar-se numa extensão doméstica ou industrial sem necessidade de utilizar ligações elétricas entre si (MESSIAS, 2008).

O *XBee* é uma solução fabricada pela empresa Maxstream. Emprega os mesmos princípios, adotando o padrão *Zigbee* para comunicação sem fio. Seus módulos usam o protocolo de rede IEEE 802.15.4 para rápidas conexões ponto a ponto ou ponto a multiponto. Esse sistema apresenta a vantagem de ser largamente difundido, a documentação disponível é abundante e não requer o desenvolvimento de bibliotecas para sua comunicação com um microprocessador embarcado. Pela porta UART de um microprocessador, os dados são recebidos por um pino receptor (Rx) e transmitidos por um transmissor (Tx) (MAXSTREAM, 2011). A figura 15 demonstra esquematicamente como é o funcionamento de comunicação entre os módulos.

Figura 15 – Sistema de comunicação entre módulos *Xbee*



Fonte: adaptado de Maxstream (2011).

Sinal Digital é uma onda com valores discretos (descontínuos) no tempo e em amplitude. Isso significa que um sinal digital só é definido para determinados instantes de tempo, e que o conjunto de valores que pode assumir é finito. A Digitalização de Sinais analógicos é obtida em três etapas: a) Amostragem: discretização do sinal analógico original no tempo; b) Quantização: discretização da amplitude do sinal amostrado; c) Codificação: atribuição de códigos (geralmente binários) às amplitudes do sinal quantizado (SHENOI, 2006).

2.5.4 Medição de aceleração

O dispositivo eletrônico usado para medição de aceleração é chamado de acelerômetro. Estão sendo cada vez mais utilizados pelo mercado eletrônico, com a diminuição do seu preço. Sua popularização deve-se ao uso em *smartphones*, transformando-se em um recurso bastante empregado para detecção de vibrações e para medição efetiva da aceleração de um objeto.

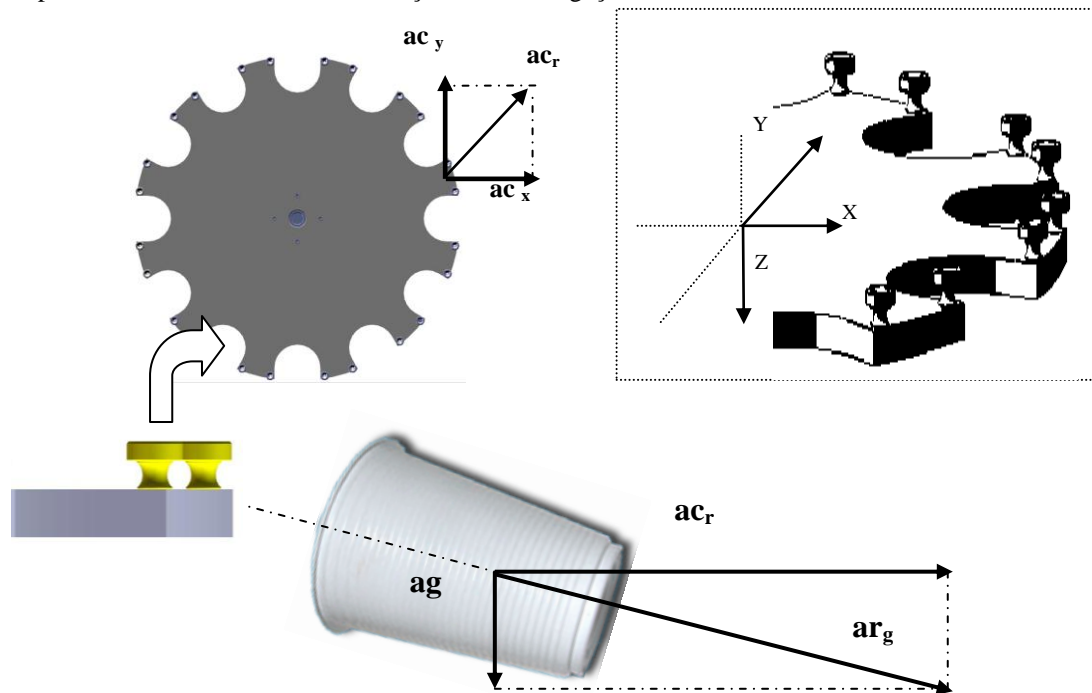
A aceleração medida pode ser estática (por exemplo, a aceleração da gravidade) ou dinâmica (por exemplo, movimentos súbitos). São muito utilizados nas indústrias de jogos, tanto para detectar a orientação da tela ou para detectar movimentos. Os acelerômetros podem ser selecionados de diversas maneiras. Sua escala define a gama e a precisão da aceleração a ser medida. Existem acelerômetros capazes de medir valores até 250 vezes maior (250G) em relação ao módulo de aceleração da gravidade. Porém, para pequenas variações na aceleração, este modelo se torna inadequado, uma vez que um acelerômetro com gama de 2G apresenta maior precisão, desde que a variação de aceleração não ultrapasse o limite. Os acelerômetros podem ser, ainda, bi-axiais, ou seja, realizam medições em dois eixos, formados por um ângulo de 90 entre si: aceleração medida no eixo X (ac_x) e aceleração medida no eixo Y (ac_y). Nesse caso, torna-se importante o cálculo da aceleração resultante (ANALOG DEVICES, 2011).

2.6 Simulação da hipergravidade

Um móvel girando em MCU apresenta, no mesmo plano, duas componentes de aceleração centrífuga: ac_x (no eixo X) e ac_y (no eixo Y). Ambas podem ser medidas através de um acelerômetro bi-axial. A combinação entre essas duas componentes produz uma aceleração centrífuga resultante (ac_r).

Por sua vez, o que se chama de *hipergravidade simulada* é o resultado da combinação entre a aceleração centrífuga resultante (ac_r) e a aceleração da gravidade (a_g), que atua no eixo Z. Essa combinação, que na verdade trata-se de outra resultante, gera a aceleração resultante geral (ar_g) (Figura 16).

Figura 16 - Representação esquemática do sistema de forças produzidas pelas acelerações agindo sobre o recipiente de amostras, durante uma seção de centrifugação



A aceleração da gravidade (ag) é executada pela ação natural da gravidade terrestre e age no eixo Z (equivale a +1Gz e está concentrada no centro de massa do corpo); a aceleração centrífuga resultante (ac_r), criada pelo movimento rotacional, age perpendicularmente ao eixo de rotação do equipamento, como combinação dos vetores componentes dos eixos X e Y; a aceleração resultante (ar_g) ocorre ao longo da direção longitudinal do recipiente, induzindo um crescimento acelerado (essa aceleração resultante geral é o que permite simular a hipergravidade).

Fonte: o autor (2012).

3 PROPOSTA: A CENTRÍFUGA

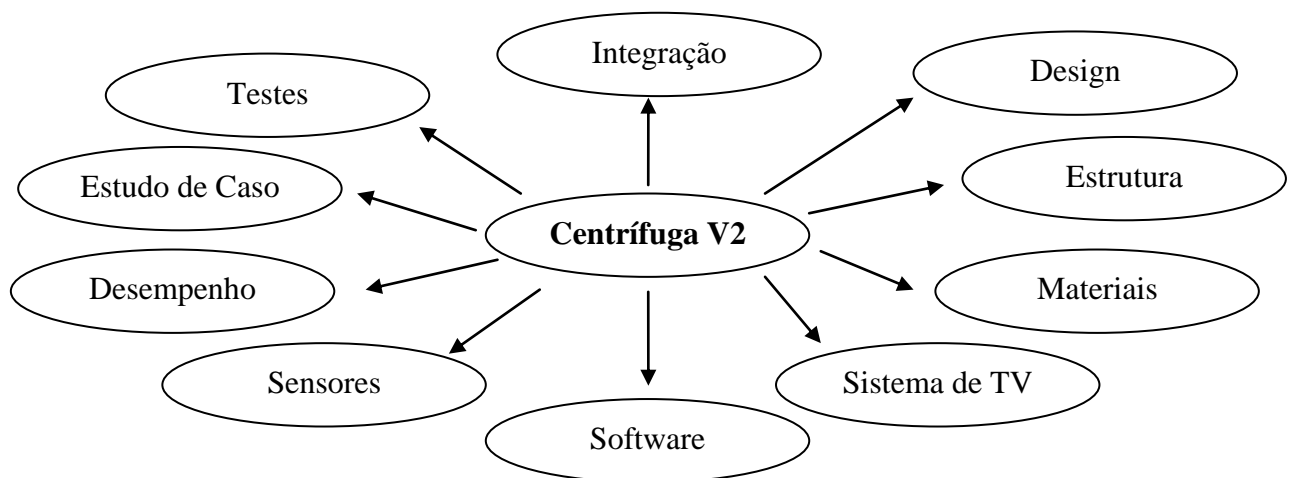
A Centrífuga V1 apresenta uma série de limitações. Além de não possuir sistemas instrumentalizados para a coleta de dados de sensores e de imagens, seu eixo de rotação é bastante instável, com movimentos de flambagem.

Assim, de modo a suprir essas limitações, é proposta a Centrífuga V2. Este capítulo aborda a metodologia empregada na especificação e implementação do aparelho, apresentando:

- as especificações e construção de um protótipo;
- o refinamento nas especificações;
- o processo de implementação de cada sub-sistema;
- a descrição dos materiais e componentes selecionados;
- os cálculos que orientaram a escolha dos componentes mecânicos;
- as justificativas sobre os motivos que determinaram a escolha de cada material, componente e especificação, de modo a solucionar os problemas de engenharia pertinentes à implementação da centrífuga.

A figura 17 apresenta o fluxo de desenvolvimento, através de um diagrama de funcionalidades propostas para a Centrífuga V2.

Figura 17 – Diagrama de funcionalidades proposto

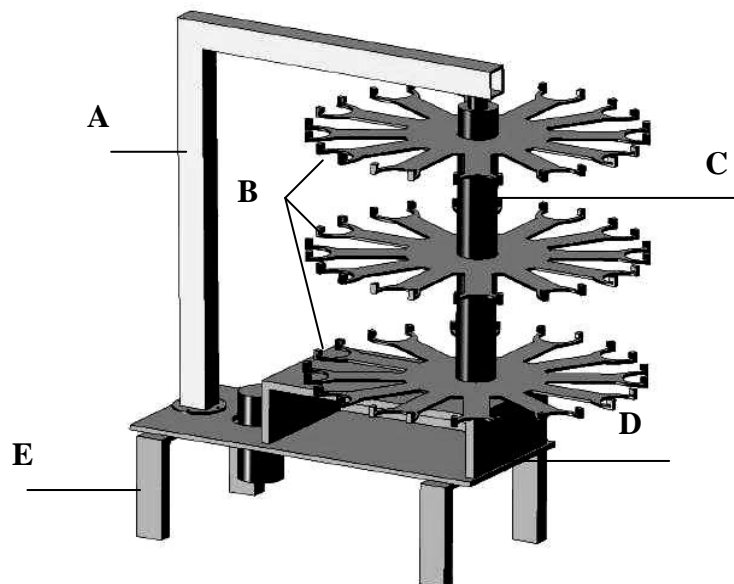


Fonte: o autor (2012).

3.1 Primeiro protótipo

Inicialmente, a estrutura da centrífuga V2 foi concebida de acordo com a figura 18. A ideia básica consistia na colocação de uma haste metálica, em aço 1045, conectada à extremidade superior de um eixo central, em aço inoxidável, para garantir a sustentação e manutenção da estabilidade de três bandejas giratórias. Além disso, a haste deveria ser oca para permitir a passagem de fiação elétrica, integrando o sistema mecânico ao eletroeletrônico.

Figura 18 – Projeto inicialmente proposto para a Centrífuga V2



(A) haste de sustentação e estabilidade; (B) três bandejas circulares com diâmetro de 700 mm; (C) eixo central com 600 mm de altura e diâmetro externo de 80 mm; (D) caixa de proteção do motoredutor e (E) suporte total do conjunto.

Fonte: o autor (2012).

As bandejas seriam projetadas em chapas finas de aço 1020, com diversas cortes (ranhuras) para diminuir o peso total. Na parte inferior, uma base metálica aberta daria proteção ao conjunto formado pelo grupo motoredutor e o sistema de transmissão de força.

Porém, essa concepção foi abandonada pelos seguintes motivos:

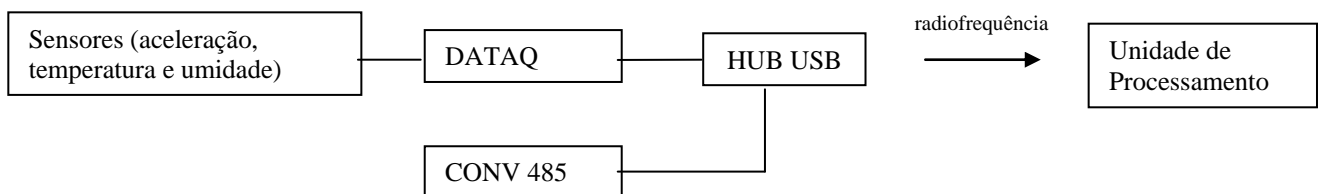
- A integração da haste de estabilidade com a fiação elétrica mostrou-se muito complexa, além de não oferecer a devida segurança aos componentes eletrônicos;
- A haste de estabilidade, além de aumentar o peso total do equipamento, também diminuiria o espaço útil ao redor da centrífuga, prejudicando sua operação;

- O suporte do conjunto, em função de sua forma geométrica, dificultaria o nivelamento na superfície de operação;
- A caixa de proteção ao motorreductor, por ser aberta em uma face, não protegeria o suficiente contra determinados agentes ambientais (exemplo: partículas de pó), além de deixar o motorreductor muito exposto ao operador;
- O material para o eixo apresentou um custo de 60% acima do esperado.

Para o sistema de transmissão de força, foi inicialmente adotado um acoplamento comercial rígido, adquirido à parte. Porém, através de experimentos empíricos, verificou-se posteriormente que, para a transmissão de valores de torque relativamente baixos (menores de 10 N.m) seria mais conveniente e econômico o emprego de um sistema formado por 2 polias unidas a uma correia de transmissão.

Com relação ao desenvolvimento eletrônico, no que se refere à transmissão de sinais dos sensores, a ideia inicial consistia em empregar um dispositivo hub com conexão USB (envio por ondas de rádio), conforme representado pelo esquema da figura 19.

Figura 19 – Esquemática da transmissão de sinais dos sensores, proposta inicialmente



Todos os componentes eletrônicos apresentados acima (com exceção da unidade de processamento) foram previstos para serem fixados na bandeja superior. Portanto, todos estariam sujeitos à rotação mecânica.

Fonte: o autor (2012).

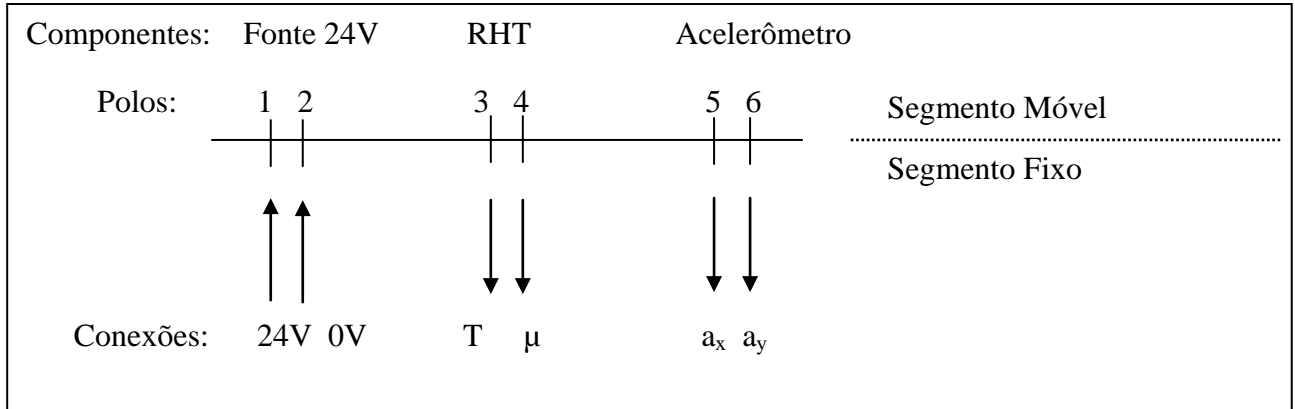
Porém, o sistema se tornou inviável pelos seguintes motivos:

- Apresenta alto consumo elétrico (2,6 A) e perda de pacotes de dados devido ao envio durante a alta rotação na centrífuga (o HUB não foi projetado para enviar dados nessa situação);
- Emprego dos dispositivos DataQ e Conversor 485 mostrou-me muito complexa e dispendiosa, além de economicamente inviável.

Como alternativa, surgiu a ideia de se empregar um conector rotativo para transmitir o sinal via cabos, e não mais por ondas de rádio, conforme esquema apresentado na figura 20.

Conectores rotativos são dispositivos eletrônicos avançados que permitem a troca de informações elétricas entre um sistema estático e um dinâmico.

Figura 20 – Diagrama esquemático das conexões empregando um conector rotativo de 6 polos



Os polos 1 e 2 são responsáveis pela transmissão, por cabos, das 2 fases de alimentação de uma fonte de 24 V; os pólos 3 e 4, correspondem aos sinais de temperatura e umidade fornecido pelo sensor RHT; por sua vez, os pólos 5 e 6 seriam responsáveis pelo envio dos componentes vetoriais da aceleração relativas aos eixos x e y.
Fonte: o autor (2012).

Esse conector, com 6 polos, seria responsável pelo envio do sinal dos 2 sensores (RHT e acelerômetro), e de uma alimentação de 24 V. O conector possui 2 polos de 30 A e 4 polos de 4 A. Os três equipamentos conectados a ele possuem medidas de corrente menores. Porém, seu emprego foi abandonado por motivos econômicos, em função de seu elevado preço.

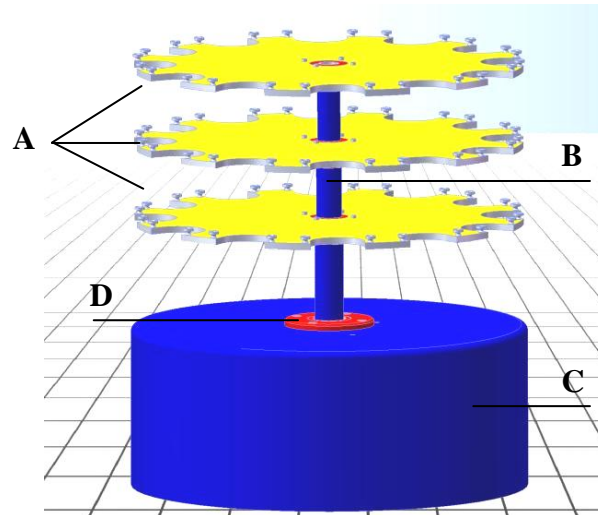
Buscando uma alternativa mais viável economicamente e que, ao mesmo tempo proporcionasse uma transmissão de dados de qualidade, consumindo pouca corrente elétrica, chegou-se à seguinte solução: empregar um conector rotativo mais simples e barato, de apenas 2 polos coaxial (apenas para os cabos da fonte de alimentação) e adquirir módulos de transmissão *zigbee* para os sensores. Estes, não requerem grandes quantidades de corrente elétrica para operar, são mais fáceis de instalar, mais eficazes na transmissão de dados (menores perdas durante rotação) e de custo mais baixo em relação ao HUB USB.

3.2 Protótipo Final

Um novo *design*, mais simples e eficiente, foi projetado, de modo a criar uma base fechada, para maior proteção dos componentes mecânicos internos, e pesada o suficiente, para baixar o centro de gravidade, evitando a necessidade de uma haste de sustentação e garantindo a estabilidade do eixo central de acordo com a hipergravidade máxima exigida.

A Centrífuga V2 foi modelada com o auxílio do software de CAD Pro/ENGINEER Wildfire 5.0. Foi projetada uma máquina de fácil operação e eficiente, conforme mostrada na figura 21.

Figura 21 – Projeto adotado para a Centrífuga V2



(A) bandejas circulares; (B) eixo central; (C) base; (D) parte superior do tambor de rolamentos.
Fonte: o autor (2012).

A centrífuga consiste de três estruturas principais. A base foi projetada em formato cilíndrico fechado, de modo a proteger os componentes em seu interior. Além disso, ela foi concebida para ser suficientemente pesada em relação ao restante da estrutura. Essa técnica mantém o centro de gravidade baixo, o que, além dos fatores construtivos, é fundamental para garantir uma rotação estável do eixo central. Foi construída a partir de uma tubulação de aço 1020 de 3 mm de espessura e 620 mm de diâmetro. O tubo foi seccionado em corte com gás oxiacetileno na altura de 250 mm e foi soldada uma tampa circular com um furo central de 80 mm de diâmetro, de mesmo material, na abertura superior do tubo. Internamente, foi soldado, no fundo, um disco ponteadado de 9 mm de espessura, de modo a garantir uma sustentação extra da carga. Também foram fixados quatro pezinhos com parafusos circulares, revestidos em borracha absorvedora de vibração mecânica. Permitiu-se um vão de 10 mm, na região inferior da base, para refrigeração natural dos componentes internos.

As três bandejas circulares foram fabricadas a partir de uma chapa retangular de PVC rígido com dimensões de 2,44 m x 1,22 m x 10 mm. Foram realizados cortes circulares com gás oxi-acetileno de 660 mm de diâmetro e um furo central com 50 mm de diâmetro, para encaixe do eixo. Adotou-se esse material por apresentar boa relação entre resistência

mecânica e densidade. Ao longo da borda foram cortados 12 vãos semicirculares (106 mm de diâmetro) em cada bandeja, para acomodar os suportes e recipientes de amostras.

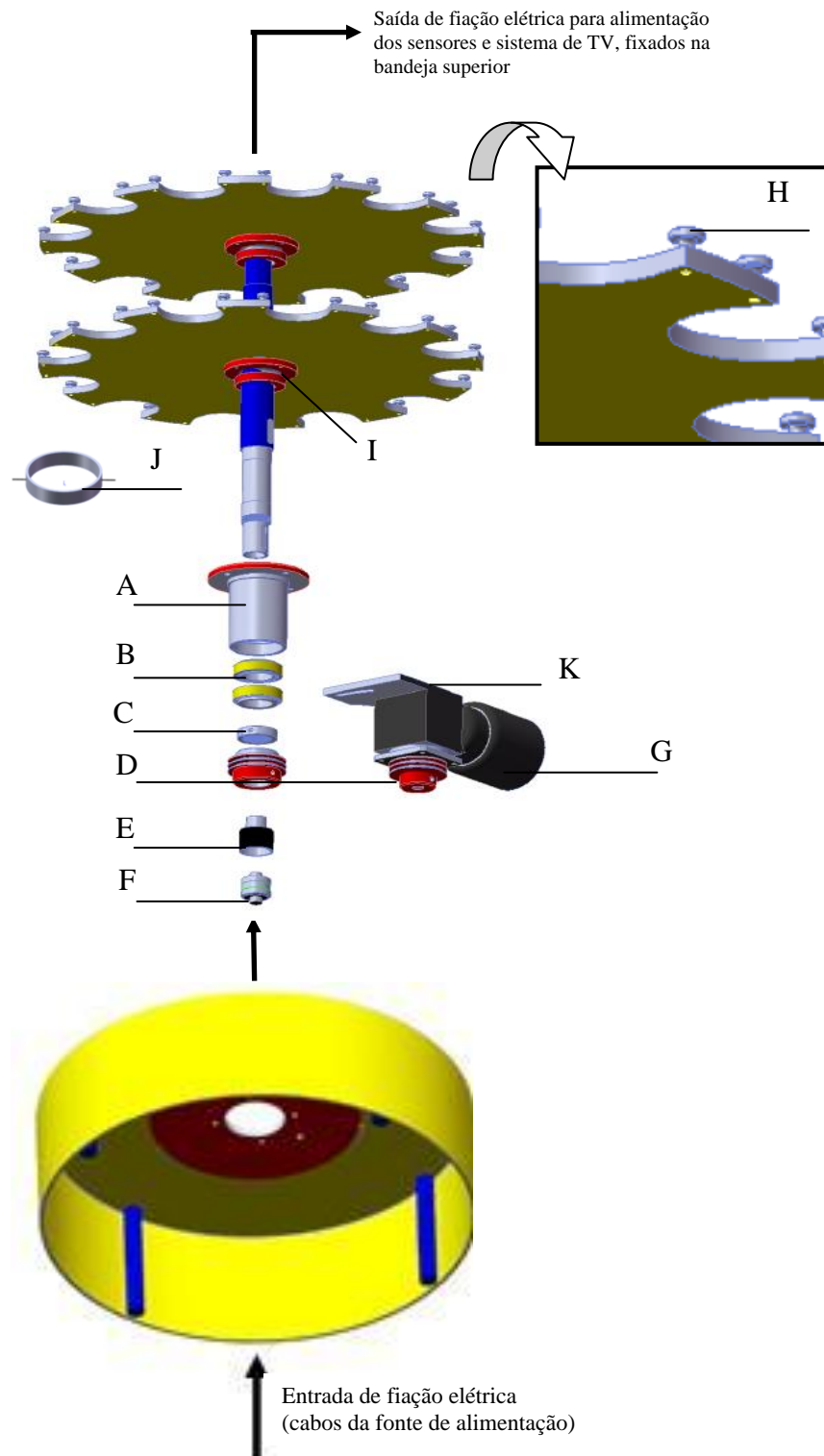
O eixo central, por sua vez, foi fabricado a partir da usinagem em torno CNC Sinitron LT-52, de um tubo mecânico trefilado em aço 1045 (foi desgastado em diferentes alturas para o encaixe das bandejas circulares), com 50 mm de diâmetro externo e um furo central de 25 mm (para permitir a passagem da fiação dos componentes eletrônicos). Foi produzida uma chaveta de 25 mm na extremidade inferior para auxiliar a transmissão de torque.

O Apêndice A apresenta os desenhos técnicos detalhados do projeto mecânico dessas peças.

3.2.1 Componentes estruturais complementares

Foram projetadas e construídas peças complementares com finalidades de suporte, fixação, rolagem e transmissão de força. A grande parte delas está localizada no volume interno da base (figura 22).

Figura 22 - Vista explodida dos componentes mecânicos integrados à estrutura principal

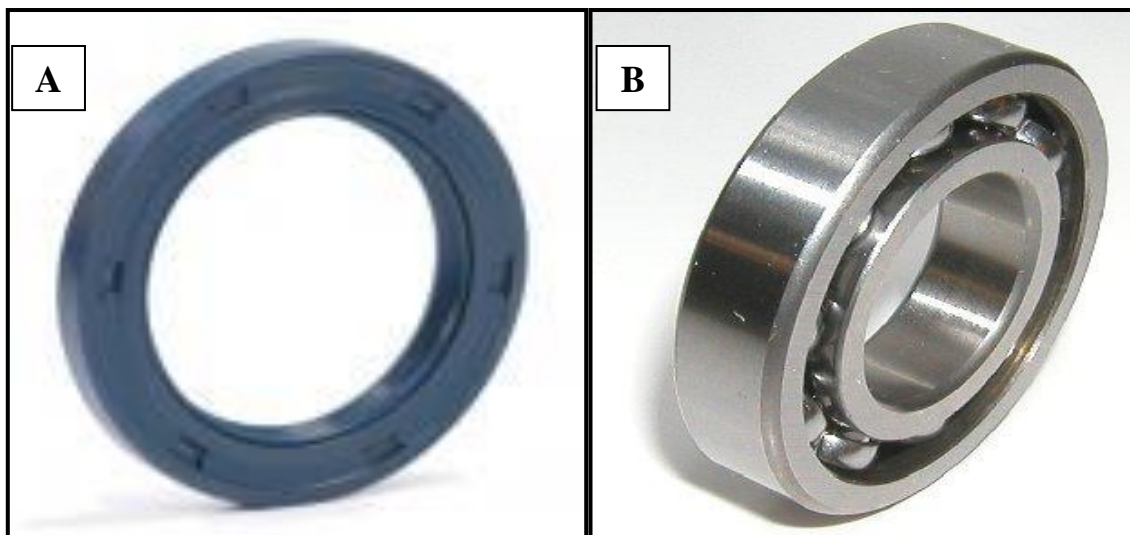


(A) tambor de rolamentos; (B) dois rolamentos de esferas; (C) o retentor de rolamentos; (D) duas polias interligadas através de uma correia; (E) suporte do conector rotativo; (F) conector rotativo; (G) grupo motoredutor; (H) buchas de sustentação dos suportes dos recipientes de amostras; (I) flanges de fixação das bandejas ao eixo central; (J) suporte dos recipientes de amostras, que é apoiada nas buchas de sustentação e (K) sistema de regulagem da correia.

Fonte: o autor (2012).

O tambor de rolamentos, projetado para absorver e aliviar a carga sobre os rolamentos, foi construído a partir de um tubo de aço 1020 de 80 mm de diâmetro interno e 100 mm de altura. Na borda superior foi soldado um disco, também de aço 1020, com 140 mm de diâmetro, e fixado com parafusos na parte superior externa da base. No volume interno do tambor foram acoplados dois rolamentos de esferas, modelo URB 6208-zz, de 80x45x18 mm para o deslizamento do eixo central livre de atritos e cargas. Também foi conectado um retentor de óleo, modelo SAV 7143 LX, de 68x45x10 para evitar o acúmulo de sujidades sobre os rolamentos e no vão de comunicação entre o eixo central e a base (figura 23).

Figura 23 - Detalhe do retentor (A) e do rolamento de esferas (B)



Fonte: o autor (2012).

A fiação elétrica atravessa toda a extensão interna do eixo. As estruturas interligadas ao longo do eixo também foram produzidas com furos internos para facilitar essa integração mecânico-eletrônica.

As bandejas foram encaixadas e fixadas ao eixo central através de três flanges de fixação, fabricadas em alumínio, com 100 mm de diâmetro externo e diferentes diâmetros internos (de modo a se ajustarem ao diâmetro do eixo no ponto de fixação). Parafusos foram adicionados para segurança extra.

Foram produzidos 36 suportes de recipientes de amostras, a partir do corte de tubos em PVC (altura de 20 mm e diâmetro interno de 40 mm). Como recipientes foram usados copos de polipropileno de 80 mm de diâmetro externo e 100 mm de altura, cujas bordas externas superiores apoiam-se ao longo da seção circular dos suportes. Em cada suporte foram prensados, em lados opostos, dois pinos de uma liga metálica de cobre e zinco (latão) com 8 mm de diâmetro por 15 mm de comprimento. Para o apoio desses pinos nas bandejas, foram

produzidas 72 buchas de sustentação, em poliacetal, com 15 mm de altura e um sulco para encaixe dos pinos dos suportes. As buchas foram fixadas ao longo das bordas das bandejas, duas para cada vão semicircular. Assim, essa forma de fixação dos suportes possibilitou um movimento livre aos recipientes, possibilitando que os suportes girem e se alinhem com o vetor resultante do giro. Essa técnica assegurou a aplicação eficaz do estímulo sobre as amostras colocadas na centrífuga.

O Apêndice A apresenta os desenhos técnicos detalhados do projeto mecânico dessas peças.

3.2.2 Sistema eletromecânico de geração de força

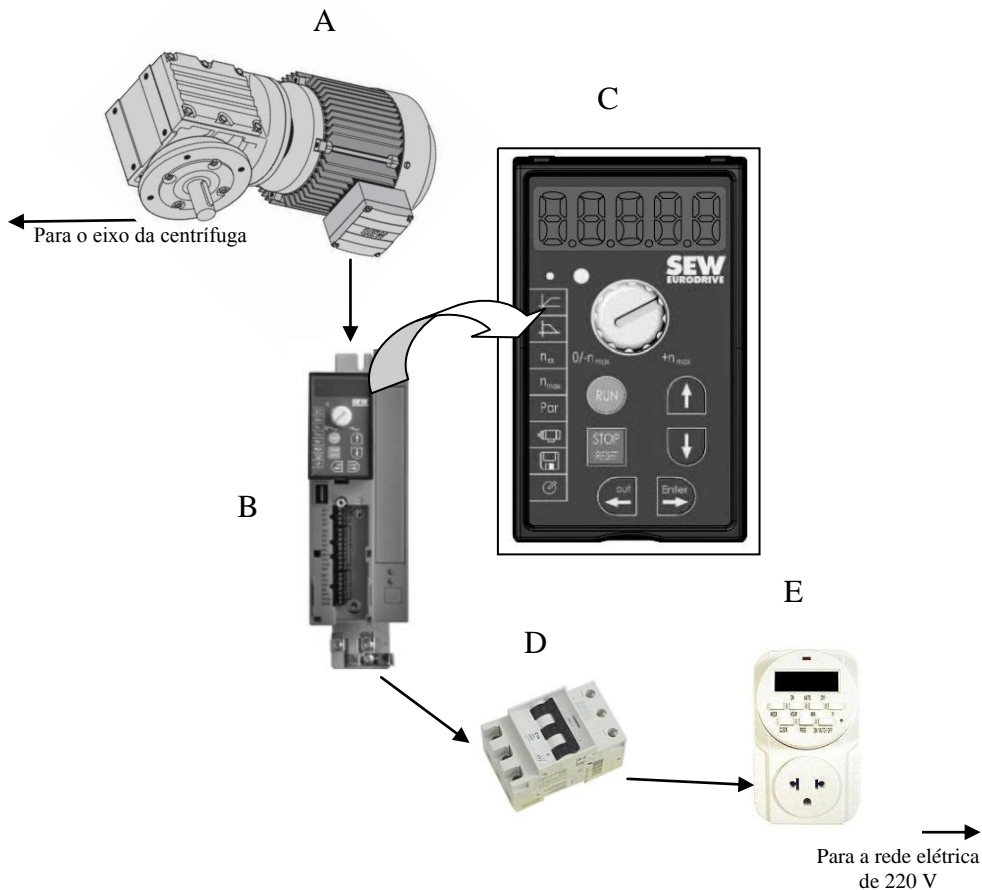
O sistema eletromecânico consiste de um motoredutor angular Spiroplan® (SEW Eurodrive - WF10 DT56M4), com alimentação de 380V (trifásico), flange de fixação de 120 mm de diâmetro e um eixo com chaveta de 40 mm de comprimento por 16 mm de diâmetro. Sua potência de 0,1 kW permitiu uma rotação de até 200 rpm e um torque de 4 N.m (SEW EURODRIVE, 2011). Isso confere uma aceleração centrífuga máxima de até +15G. O conjunto foi conectado a um sistema de polias e correia para a transmissão do torque ao eixo central. Ao recebê-lo, o eixo central, apoiado sobre os rolamentos e o tambor, retransmitiu-o às três bandejas, gerando o fenômeno de hipergravidade simulada requerida na pesquisa.

O acionamento e a velocidade de rotação do motor foram automaticamente controlados por um conversor de frequência MOVITRAC, modelo SEW Eurodrive MC07B0003-2B1-4-00, com potência de 0,25 Kw, conexão de rede trifásica de 380 V_{CA} (SEW EURODRIVE, 2011). O sistema foi protegido por um disjuntor tripolar modelo Siemens 5SX1 C10A. As três fases do motor, juntamente com a fase terra, foram ligadas aos *bornes* do conversor através de um cabo blindado, fundamental para evitar a geração de ruídos. O conversor possui, também, portas específicas de ligação para o acionamento do motor e definição do sentido de rotação (nesse trabalho, foi programado para girar no sentido anti-horário).

Adicionalmente, ele foi integrado a um controle de parâmetros modelo SEW Eurodrive FBG11B que permitiu a programação das condições de rotação do motoredutor (rotação máxima desejada, tipo de motor e rampas de aceleração e desaceleração). Além de armazenar estes dados de configurações na memória, o controle também pode operar manualmente. Nesse caso, a velocidade pode ser controlada através de um botão ligado a um potenciômetro presente na parte interna do controle. Um temporizador digital bivolt de tomada, modelo DNI 6610, foi acoplado à rede elétrica para programar a ligação do sistema, cortando e ativando

automaticamente a energia elétrica de acordo com os horários estabelecidos pelos protocolos de pesquisa. A figura 24 apresenta o esquema geral do sistema eletromecânico, mostrando as ligações entre seus componentes.

Figura 24 - Representação esquemática da ligação elétrica do sistema eletromecânico

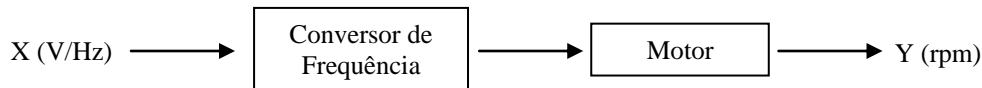


(A) grupo motoredutor; (B) conversor de frequência; (C) detalhe ampliado do controle de parâmetros; (D) disjuntor tripolar; (E) temporizador digital de programação.
Fonte: o autor (2012).

3.2.2.1 Sistema de controle em malha aberta

A ligação entre o conversor de frequência e o motor funciona como um sistema de controle em malha aberta. Para seu correto funcionamento, os elementos devem ser confiáveis. Assim, o conversor é alimentado com os parâmetros elétricos de entrada Y, tais como tensão (220 V) e frequência da rede elétrica (60 Hz). Em seguida, ele converte essa frequência, ou seja, entrega para o motor somente o valor de frequência correspondente ao que foi programado em seus parâmetros, provocando, na saída Y, a rotação desejada em rpm. A figura 25 apresenta um diagrama de blocos sistematizando esse processo.

Figura 25 – Sistema de controle em malha aberta



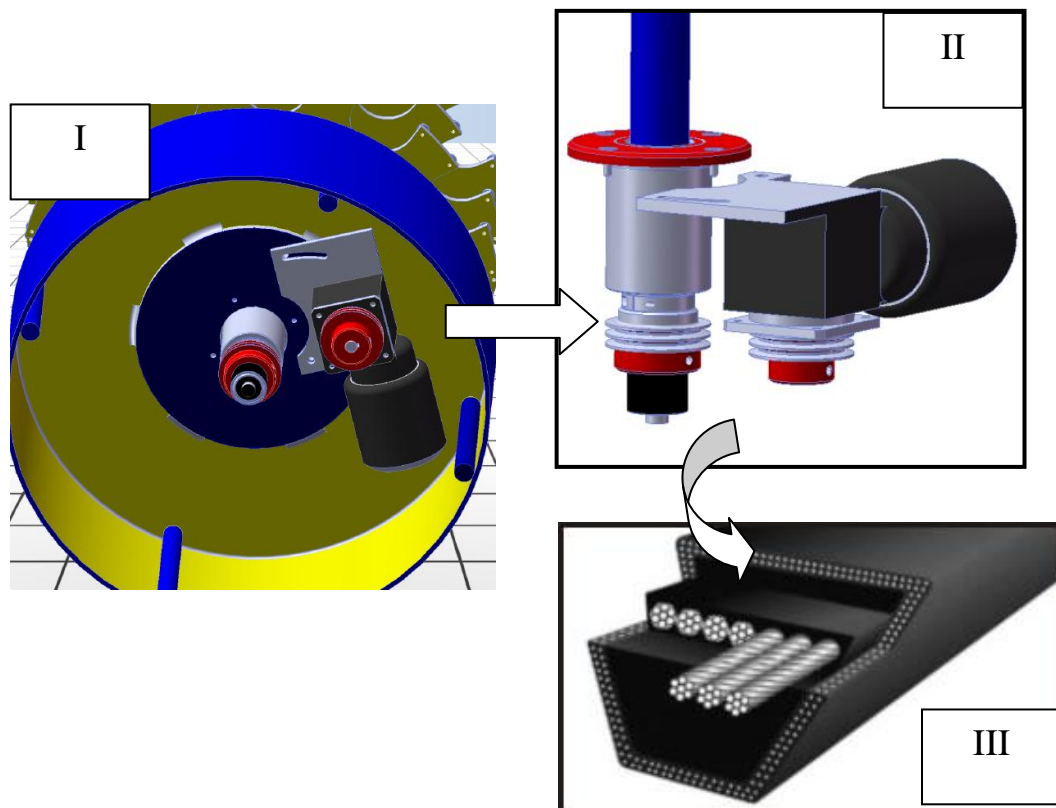
Fonte: o autor (2012).

3.2.3 Sistema de transmissão de força

Foram usinadas, em um torno universal comum, da marca Sanches Blanes, duas polias em Nylon 6 (material polimérico com adequada resistência mecânica, resistência ao impacto e boa rigidez), ambas com 47 mm de altura, 66 mm de diâmetro externo e um trilho de 11 mm para deslizamento da correia. A primeira polia foi fabricada com um diâmetro interno de 35 mm e um rasgo de chaveta para encaixe à extremidade inferior do eixo central da centrífuga. A segunda, com um diâmetro interno de 16 mm, foi produzida com um rasgo de chaveta, para acoplamento ao eixo do motoredutor. Para a transmissão da força, foi utilizada uma correia industrial de lona multicamada, em perfil V, da marca Mercúrio. Esse tipo de correia caracteriza-se por possuir elevado rendimento na transmissão de potência e boa resistência a óleos lubrificantes e ao calor. É indicada para situações de uso prolongado e para quando a distância entre os eixos é relativamente pequena. Para a regulagem da correia, foi produzido um regulador de correia retangular (90 mm x 110 mm) em aço 1020, e foi parafusado à flange do motoredutor (Figura 26).

Toda a estrutura descrita foi acomodada em uma resistente bancada com tampo retangular em madeira de Jatobá (1200 x 800 x 50 mm) e pernas em aço 1040 (910 mm de altura). À extremidade do tampo, foi fixada uma régua elétrica disponibilizando tomadas em diversos padrões.

Figura 26 – Sistema de transmissão de força



(I) Vista inferior do equipamento, apresentando o sistema de transmissão de força; (II) detalhe da vista frontal demonstrando os componentes (polias, motorreductor e regulador de correia); (III) corte em perfil da correia industrial.

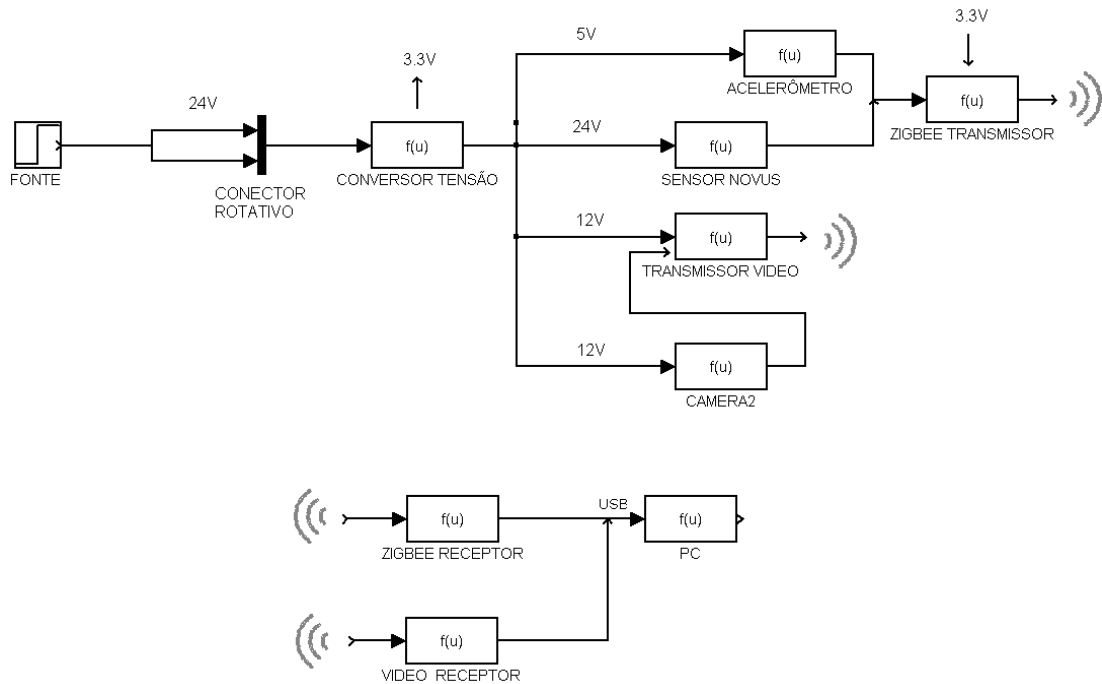
Fonte: o autor (2012).

3.3 Projeto Eletrônico: concepção geral

Basicamente, foram fixados na superfície plana da bandeja superior os seguintes componentes eletrônicos: um sensor RHT, um acelerômetro, um transmissor de ondas de rádio, um transmissor de imagens em ondas VHF e uma minicâmera de TV. Todos esses componentes foram alimentados por uma fonte 24 V externa. Os sinais transmitidos pelos sensores e pela minicâmera foram recebidos por dispositivos receptores (Figura 27).

Esse projeto foi criado para monitorar variáveis importantes e o comportamento do crescimento das amostras vegetais.

Figura 27 - Diagrama de blocos esquematizando o projeto eletrônico geral, integrado em seus três diferentes sistemas



Fonte: o autor (2012).

Os próximos itens descrevem detalhadamente cada um dos três sistemas que compõem o projeto eletrônico.

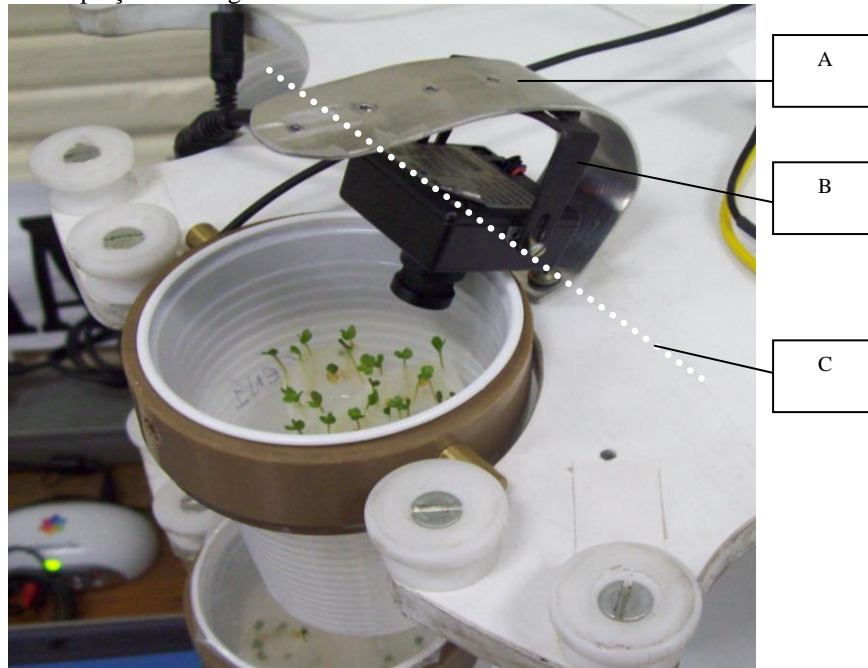
3.3.1 Sistema de Captura e Transmissão de VHF

Esse sistema foi desenvolvido em duplicada, registrando-se o crescimento vegetal de um recipiente de amostras da Centrífuga V2 e de um recipiente do controle.

Para as amostras submetidas à hipergravidade simulada foi empregada uma minicâmera de TV em cores, modelo HDL HM52 443, de 12 V_{DC} e 100 mA, com 380 linhas de resolução. Para garantir a total captação de imagens durante a filmagem na Centrífuga V2, foi criado um suporte para a câmera, em alumínio flexível. A peça permite o movimento livre do eixo transversal da minicâmera para acompanhar o movimento produzido pela aceleração centrífuga. Assim, a minicâmera esteve sujeita à mesma força resultante em relação ao recipiente amostral, inclinando-se com o mesmo ângulo (Figura 28). Dessa forma, sua posição em relação ao recipiente foi automaticamente corrigida, mantendo-se constante uma distância de 40 mm entre a minicâmera e o recipiente. O foco também foi ajustado para essa distância focal. Essa técnica permitiu a filmagem em tempo integral para o período diurno (ou seja,

tanto durante os períodos em movimento quanto nos intervalos de repouso determinados nos protocolos de pesquisa).

Figura 28 – Sistema de captação de imagens



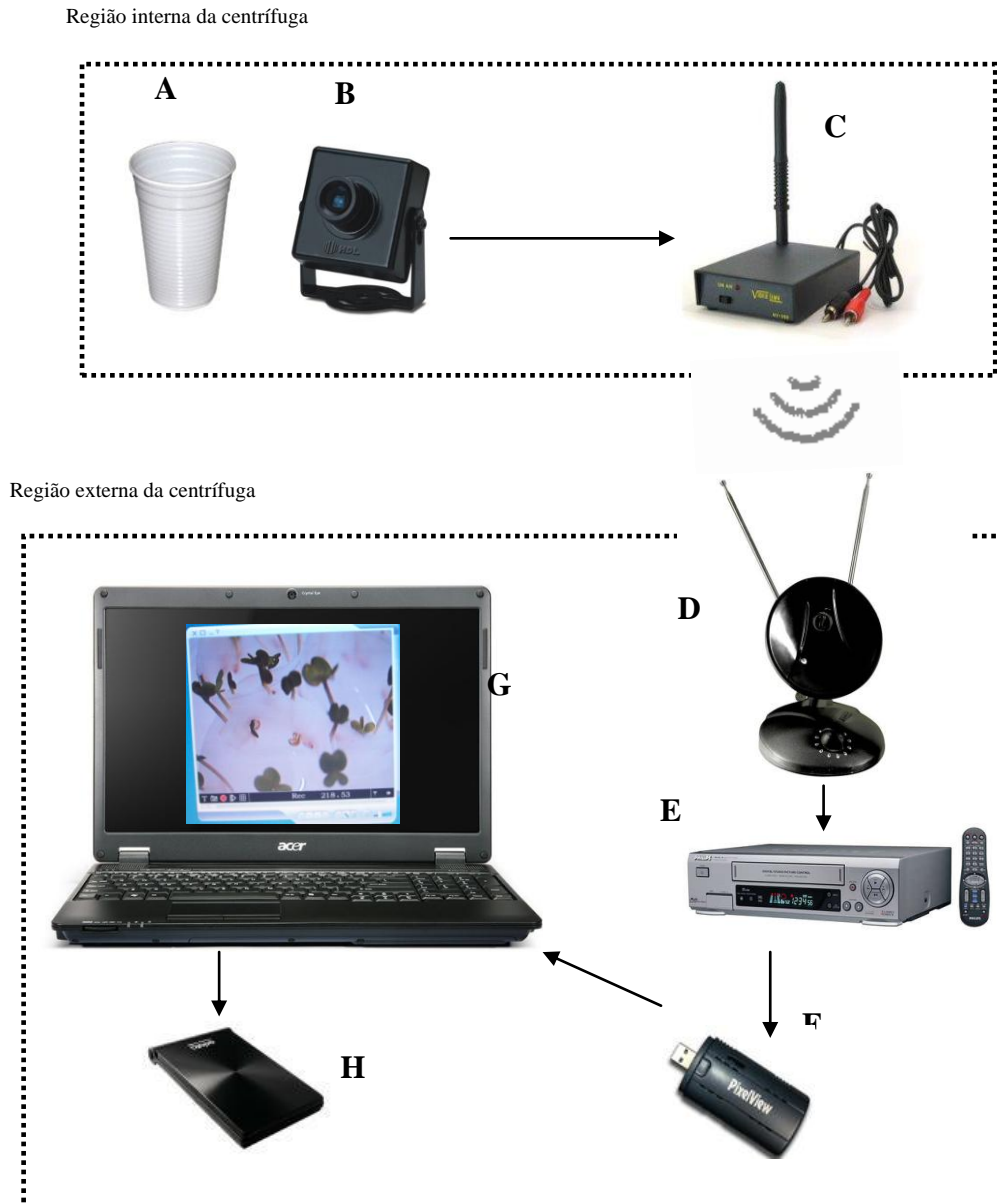
(A) Suporte flexível da minicâmera, fixado à bandeja superior; (B) apoio rígido da minicâmera; (C) a linha pontilhada representa o eixo livre de rotação da minicâmera (para isso, as suas laterais foram furadas e presas com parafusos ao apoio).

Fonte: o autor (2012).

Após a captura das imagens, as mesmas foram enviadas para um transmissor de ondas VHF, modelo Videolink NY-050, também fixado na bandeja superior da centrífuga. Sua antena multirecional bivolt tem a capacidade de transmitir imagens analógicas ao longo de um raio de até 50 m, via canal 16 de TV VHF. Esse sinal foi captado por um videocassete de 6 cabeças, modelo Philips VR610, sintonizado no canal 16, no padrão NTSC, através de uma antena analógica modelo Indusat 3503. Na sequência, as imagens foram retransmitidas, via conexão RCA, para ser digitalizada por uma placa portátil externa de captura de vídeo, modelo PixelView Play SBTVD Hybrid. A placa foi conectada à porta USB da unidade de processamento, um notebook Acer Travelmate 244XC, com 256 MB de memória RAM, processador Intel Celeron 2,6 GHz e Windows XP. Instalou-se o *software* da placa, Pixelviewer ver. SB2.03, para visualização das imagens, permitindo a configuração de parâmetros, tais como: a fonte de captura (se via antena ou composto – RCA), o agendamento automático dos horários das gravações e o formato da captura (foi utilizado o formato MPEG). Para garantir o armazenamento integral das imagens digitais, um HD externo de 1TB

(Toshiba) foi ligado à uma porta USB da unidade de processamento. A figura 29 apresenta a esquematização e as ligações entre esses componentes.

Figura 29 - Representação esquemática da transmissão de TV da Centrífuga V2



(A) recipiente de amostras a ser filmado; (B) minicâmera de TV; (C) sistema Videolink de transmissão de VHF; (D) antena de recepção; (E) videocassete para recepção analógica do sinal; (F) placa de captura PixelView para digitalização do sinal; (G) unidade de processamento com *software* para apresentação das imagens; (H) HD externo para armazenamento de dados. OBS: no esquema acima, o quadro pontilhado superior representa os componentes fixados na estrutura interna da centrífuga e, portanto, sofreram o efeito da aceleração centrífuga; o quadro pontilhado inferior engloba os componentes localizados na região externa à centrífuga, não estando sujeitos ao movimento.

Fonte: o autor (2012).

Para o registro das amostras do controle, também foi empregada uma minicâmera de TV em cores, modelo HDL HM52 443, de 12V_{DC} e 100 mA, com 380 linhas de resolução. O

componente foi fixado em um suporte de madeira, preso a uma caixa metálica (figura 30), onde os recipientes de amostras do controle foram acondicionados. Nesse caso, a minicâmera não teve necessidade de movimento livre, uma vez que todo o conjunto mantém-se em repouso durante todo o período de filmagem.

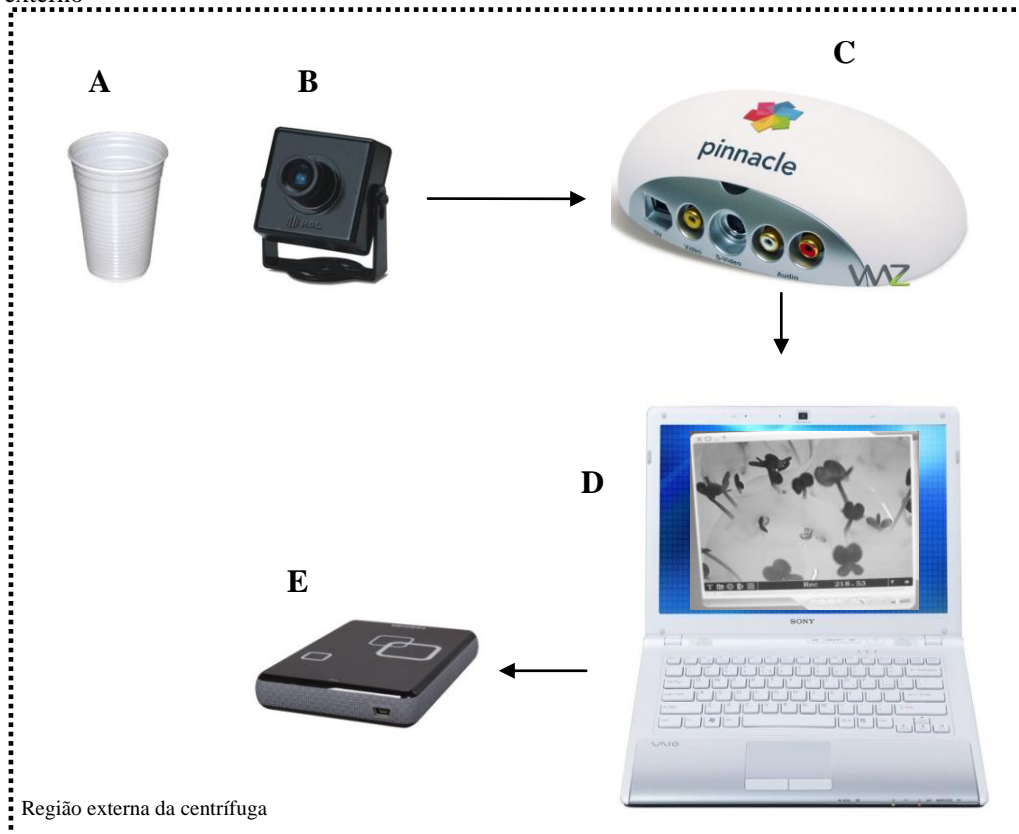
Figura 30 - Sistema de captação de imagens do controle. A minicâmera está fixada em um suporte de madeira e os recipientes de amostras encontram-se organizados dentro de uma caixa metálica



Fonte: o autor (2012).

Após a captura das imagens, a minicâmera transmitiu diretamente os sinais para serem digitalizados por uma placa externa de captura de vídeo, modelo Pinnacle Studio MovieBox HD USB. A placa foi ligada a uma porta USB da unidade de processamento (notebook Sony Vaio VPC-M120B, com 2GB de memória RAM, processador Intel Atom N470 e sistema operacional Windows 7 Starter). Instalou-se o *software* da placa (Pinnacle Studio HD 14), podendo-se configurar parâmetros, como: padrão de imagem (foi utilizado o padrão NTSC), formato de vídeo (MPEG 1) e a localização do local de armazenamento das gravações dos vídeos digitais. Nesse caso, foi empregado um HD externo USB de 500 GB, modelo Adata NH92. A figura 31 apresenta a esquematização e as ligações entre esses componentes.

Figura 31 - Representação esquemática do sistema de transmissão de vídeos do controle. Todo o sistema é externo



(A) recipiente de amostras a ser filmado; (B) minicâmera de TV; (C) placa digitalizadora de sinais de TV Pinnacle; (D) unidade de processamento com *software* para apresentação das imagens; (E) HD externo para armazenamento de dados. OBS: no esquema acima, o quadro pontilhado engloba os componentes localizados na região externa à centrífuga, não estando sujeitos ao movimento.

Fonte: o autor (2012).

Para alimentação da minicâmera, foi usada uma fonte de tensão 12 V_{DC} chaveada, modelo IMP 433, ligada diretamente aos terminais da minicâmera e à rede elétrica.

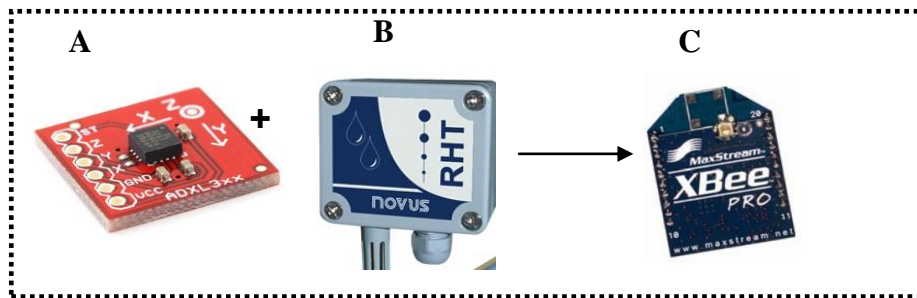
3.3.2 Sistema de Sensoriamento

Foram fixados dois sensores na bandeja superior da centrífuga e uma placa transmissora de radiofrequência. Para medição da aceleração, adotou-se um acelerômetro bi-axial 18g, modelo Analog Devices ADXL321, que disponibiliza as voltagens analógicas nos eixos X e Y.

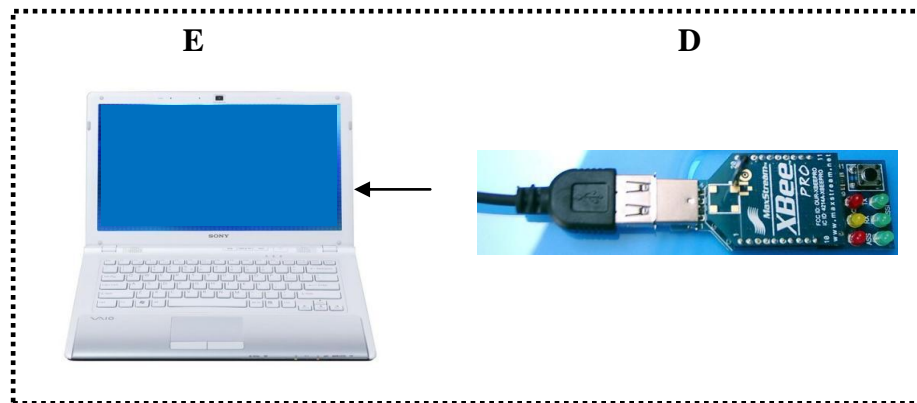
Para medição de temperatura e umidade do ambiente foi empregado um sensor RHT, modelo Novus WM 0-10V. Ambos os sensores enviam os sinais de tensão analógicos medidos para o módulo transmissor *Xbee*. O módulo transmissor emite ondas de radiofrequência (através de uma antena omnidirecional embutida), recebidas por um módulo *Xbee* receptor. A figura 32 apresenta a esquematização e as ligações entre esses componentes.

Figura 32 - Representação esquemática do sistema de transmissão de dados dos sensores por RF

Região interna da centrífuga



Região externa da centrífuga



(A) acelerômetro; (B) sensor RHT; (C) módulo de transmissão *zigbee*; (D) placa adaptadora USB de digitalização + módulo de recepção *zigbee*; (E) unidade de processamento executando um programa criado para a apresentação dos dados. OBS: no esquema acima, o quadro pontilhado superior representa os componentes fixados na estrutura interna da centrífuga e, portanto, sofreram o efeito da aceleração centrífuga; o quadro pontilhado inferior engloba os componentes localizados na região externa à centrífuga, não estando sujeitos ao movimento.

Fonte: o autor (2012).

Cada um desses componentes é descrito nos itens seguintes.

3.3.2.1 Sensor de umidade relativa e temperatura (RHT)

Utiliza um sensor capacitivo para medição de umidade relativa e sensor Pt100 para temperatura (figura 33). Apresenta duas saídas de $0-10V_{DC}$, proporcionais a valores entre 0 e 100% (umidade relativa) e entre -60 e $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura). Sua alimentação pode ser feita num largo intervalo de tensão, de 18 a 30 Vcc , uma vez que o dispositivo contém um circuito que tolera essa grande faixa, dando flexibilidade a uma maior gama de aplicações (NOVUS, 2010).

Figura 33 – Sensor de temperatura e umidade (RHT) utilizado



Fonte: Novus (2010).

3.3.2.2 Acelerômetro

Permite leituras até +18Gz. Leva 1,45 s para atingir o *set point* (figura 34). Pode medir tanto a aceleração dinâmica (vibração), quanto a aceleração estática (gravidade) podendo ser empregado, inclusive, no monitoramento da vibração e sua compensação (ANALOG DEVICES, 2010).

Figura 34 – Sensor de aceleração empregado



Fonte: Analog Devices (2010).

3.3.2.3 XBee

XBee é um módulo de transmissão sem fio que funciona de acordo com o protocolo *zigbee* (figura 35). Possui comunicação serial, além de alguns outros importantes recursos, com os quais é utilizado o conversor analógico-digital. Foi configurado de modo a ler os quatro valores de tensão analógica de entrada, referentes aos sinais dos sensores, realizando a

conversão para um sinal digital de 10 bits, o que significa que o valor lido estará entre 0 e 1023.

O outro terminal do módulo *XBee* é conectado diretamente a um programa de computador desenvolvido, que recebe os valores pela porta serial do computador. Ele faz a leitura das informações e as imprime na tela, para visualização do usuário.

Figura 35 – Módulo *zigbee* padrão



Fonte: MaxStream (2011).

O *zigbee* também possui o recurso de um conversor analógico digital. Seis pinos do módulo podem ser utilizados como entradas analógicas que, através do seu processamento interno, irá converter a leitura das entradas analógicas em digitais e, assim, enviá-las a outro módulo que, ou as reproduzirá via modulação por largura de pulso, ou as enviará à UART de um microprocessador via porta serial (MAXSTREAM, 2011).

3.3.2.4 Programa de computador desenvolvido

Para a leitura dos dados seriais recebidos pela porta UART do computador, foi desenvolvido um programa com base na plataforma *Processing* 1.5.1 (editor e interpretador do código). Os recursos utilizados neste programa foram a comunicação serial, processamento de dados e de imagens. Com isso, interpretam-se as medições dos sensores, convertendo-as para as grandezas físicas desejadas (temperatura, umidade e acelerações nos eixos X e Y). Após, ele apresenta as informações em um painel para monitoramento instantâneo, permitindo ao usuário uma rápida identificação.

O Apêndice C apresenta o código completo de desenvolvimento do programa.

3.3.3 Sistema de alimentação dos componentes

Todos os componentes fixados na bandeja superior da centrífuga são alimentados a partir de uma fonte de tensão 24 V chaveada, modelo Hayonik FCTM 2402, de origem externa aos sistemas. A comunicação entre um ambiente estático e um dinâmico, através da transmissão da corrente elétrica entre a região externa (em repouso) e a região interna (em movimento rotacional), foi possível com o emprego de um conector rotativo modelo Mercotac 205 (figura 36). O dispositivo possui dois polos de 4 A, com terminais soldáveis nas extremidades (MERCOTAC, 2011).

Figura 36 – Conector rotativo empregado, já com os cabos da fonte ligados a um de seus terminais soldáveis



Fonte: o autor (2012).

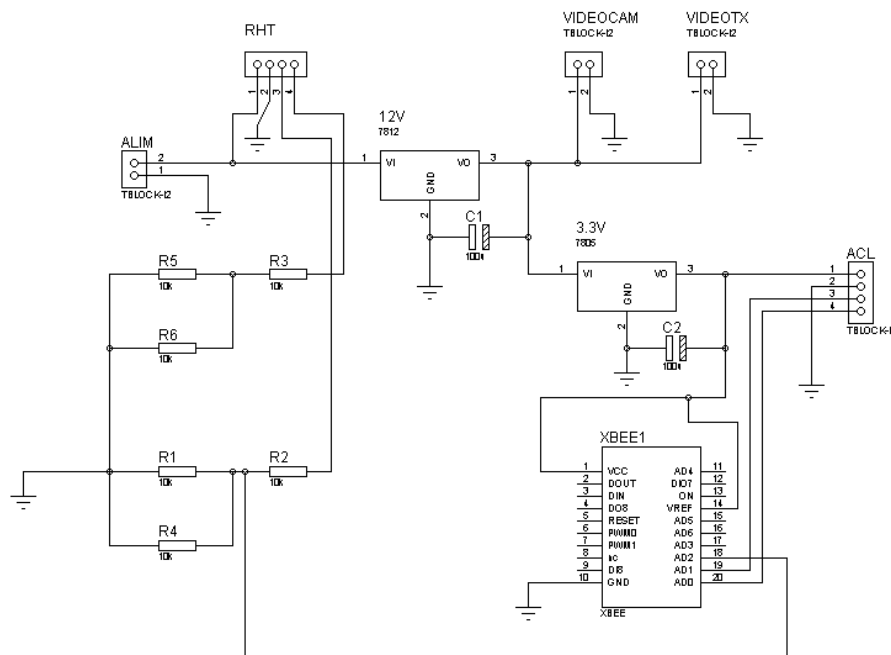
Para a integração do conector rotativo ao eixo central da centrífuga, foi usinado um suporte de poliacetal, em um torno universal comum. O suporte foi encaixado, em uma extremidade, ao furo de 35 mm da primeira polia e, na outra extremidade, ao terminal soldável do conector rotativo (8 mm de diâmetro). Assim, além de fixação, o suporte também foi fundamental para a absorção das cargas sobre a carcaça do conector, aumentando sua durabilidade. Os dois polos da fonte de alimentação passam pelos terminais soldáveis do conector rotativo e, em seguida, os 24 V devem ser convertidos para as diferentes tensões de alimentação dos diversos componentes eletrônicos fixados na parte superior da centrífuga (toda a fiação atravessa a seção oca do eixo central). Para isso, foi desenvolvida uma placa reguladora de tensões.

3.3.3.1 Placa reguladora de tensões

Surgiu a necessidade de unificar o sistema de alimentação e de distribuição dos dados dos diversos dispositivos em uma só placa eletrônica de circuito impresso, de modo a conter todos os componentes necessários e integrar os diferentes níveis de tensões trabalhados. Essa placa é alimentada direto da fonte, ligada ao conector rotativo.

Uma vez selecionados todos os componentes, foi montado o esquemático do circuito (no *software* Proteus v9.4), levando em consideração todas as necessidades do projeto, as devidas saídas para alimentação dos sensores, entradas para recepção dos dados e transmissão *wireless* destes (figura 37).

Figura 37– Projeto da placa reguladora de tensões realizado no *software* Proteus



Fonte: o autor (2012).

Após a criação do projeto, este é exportado para outro módulo do *Proteus* (denominado *Ares*), onde foi realizado o *design* da placa de circuito impresso. Foi tomado o cuidado para não produzir curvas de 90° nos cantos das trilhas condutivas, uma vez que elas provocam a criação de antenas, o que poderia gerar interferências nos sinais trabalhados (TAVARES, 2000).

Também foi produzida uma malha de terra para maior segurança do projeto. É verificada a presença de capacitores nos reguladores de tensão para filtrar quaisquer alternâncias que a corrente elétrica tenha.

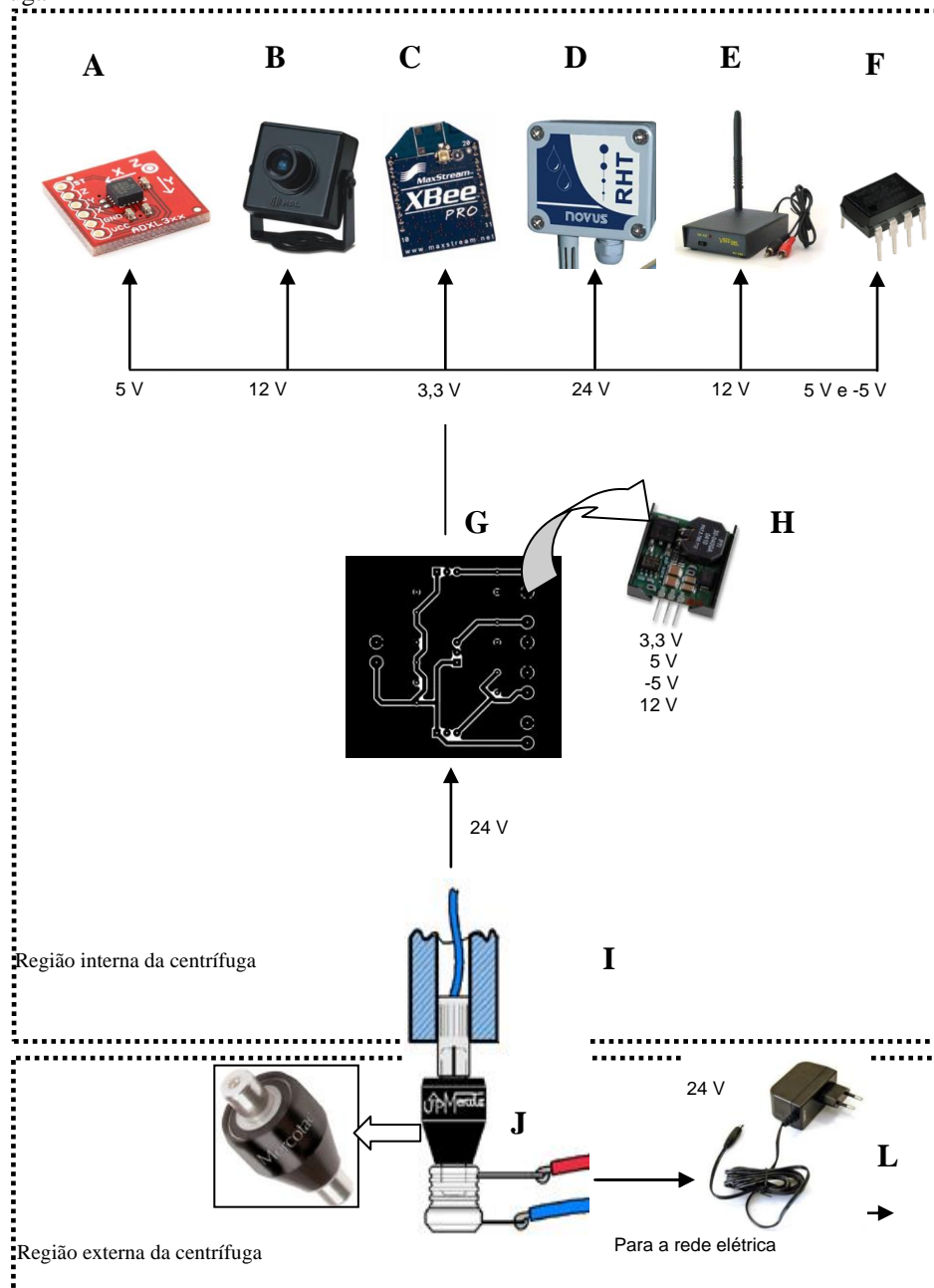
Após essa etapa, a placa foi construída. Foi realizada a impressão e corrosão da placa, os componentes foram soldados e foi realizado um teste de funcionalidade, já com todos os sensores e conexões da placa. Esses procedimentos foram efetuados no Laboratório de Eletrônica de Potência da PUCRS (LEPUC). Após verificada a funcionalidade da placa, ela foi fixada na centrífuga para testes durante o movimento de rotação.

Com relação ao seu funcionamento, ao receber os 24 V da fonte, essa placa tem o objetivo de converter essa tensão para: 5 V (para alimentação do acelerômetro); 12 V (para alimentação do transmissor de VHF e da minicâmera de TV), 3,3 V (para alimentação do módulo transmissor de RF) e -5 V (o amplificador operacional, excepcionalmente, exige alimentação simétrica de 5 V e -5 V).

Porém, uma vez que a alimentação do módulo transmissor de RF é de 3,3 V, o sinal máximo de 10 V (do sensor RHT) e de 5 V (do acelerômetro) podem queimar o dispositivo. Para evitar, foi empregado um amplificador operacional, modelo Norton LM3900, a fim de limitar a tensão de saída dos sensores, sem perda de dados.

As conversões foram realizadas por circuitos integrados (CIs) de regulação de tensão chaveados, soldados à placa. Esses CIs são energeticamente mais eficientes em relação aos reguladores de tensão lineares, que necessitam de um dissipador de calor acoplado. Foram empregados CIs PT78ST112V, PT78ST133S, PT78ST105V e PT79SR105V (Texas Instruments), para as regulagens de 12 V, 3,3 V, 5 V e -5 V, respectivamente. A figura 38 apresenta a esquematização e as ligações entre esses componentes.

Figura 38 - Representação esquemática do sistema de alimentação dos componentes fixados na bandeja superior da centrífuga



(A) acelerômetro; (B) minicâmera de TV; (C) módulo transmissor de RF; (D) sensor RHT; (E) transmissor de VHF; (F) amplificador operacional; (G) placa conversora de tensão; (H) CI's conversores de tensão; (I) suporte do conector rotativo; (J) conector rotativo instalado abaixo da extremidade inferior do eixo central; (L) fonte de tensão para alimentação dos componentes.

Fonte: o autor (2012).

3.4 Cálculos de Dimensionamento de Projeto

O projeto mecânico e suas partes, descritas nos itens anteriores, foram orientado a partir de uma série de cálculos e considerações, realizados preliminarmente à obtenção e fabricação dos componentes. Eles auxiliam a entender os motivos que nortearam a escolha de diversos

componentes mecânicos, justificando-as. Também definem aspectos importantes, como o dimensionamento do equipamento e os valores mínimos de potência e torque do motor a serem empregado.

Importante salientar que, basicamente, o equipamento foi projetado para atender as necessidades das investigações em Biologia Espacial efetuadas no Centro de Microgravidade, uma vez que a Centrífuga V2, como foi comentado anteriormente, é sua ferramenta-chave.

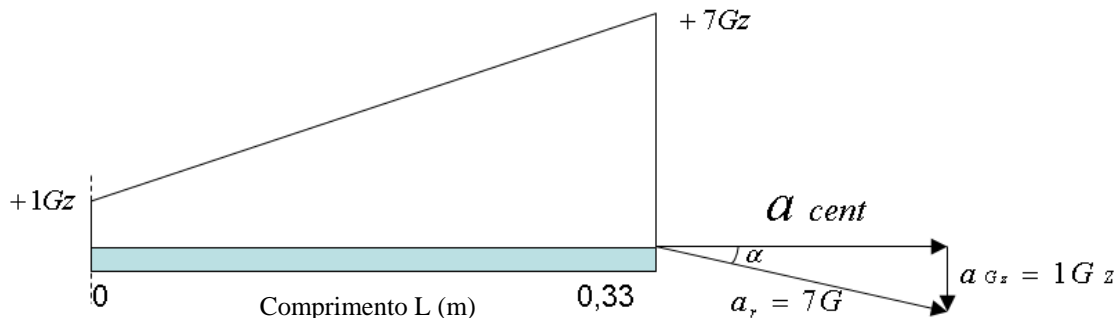
Portanto, as escolhas dos componentes foram realizadas tendo, como ponto de partida, as aplicações do equipamento.

3.4.1 Frequência de rotação e Força G

Um importante parâmetro de operação é a frequência de rotação (em rpm) que deve ser programada na centrífuga. Esta pode ser calculada conhecendo-se o número de Força G desejada para um determinado experimento.

Primeiramente, é importante conhecer o diagrama de forças (figura 39). O valor de $+7G_z$, apresentado na figura, foi adotado tendo como referência o trabalho de RUSSOMANO *et al.*, 2007.

Figura 39 – Esquematização do diagrama de forças



a_{cent} representa a aceleração centrípeta; a_{Gz} é a aceleração gravitacional no eixo Z e a_r é a aceleração resultante.
Fonte: o autor (2012).

A partir do valor desejado (aceleração resultante de $+7G_z$), pode-se determinar o ângulo α e, com ele, a aceleração centrípeta, que é empregada para o cálculo da frequência de rotação equivalente, conforme demonstrado a seguir.

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \frac{a_{Gz}}{a_r} = \frac{1}{7} = 0.143 \\ \alpha &= 8,21^\circ \\ \cos 8,21^\circ &= \frac{a_{cent}}{a_r} = \frac{a_{cent}}{7} \\ a_{cent} &= 0.989 \times 7 = 6.923 \text{ G} \\ a_{cent} &= 6.923 \times 9.81 = 67.914 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ a_{cent} &= \omega^2 \times L \\ \omega &= \sqrt{\frac{a_{cent}}{L}} = \sqrt{\frac{67.914}{0.33}} = 14.346 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \\ 14.346 \times \frac{60}{2\pi} &= 134 \text{ rpm} \end{aligned}$$

a_r é a aceleração resultante; a_{cent} é a aceleração centrípeta e ω é a velocidade angular.

Dessa forma, para gerar os +7Gz desejados em uma centrífuga com 0,33 m de raio, deve-se programá-la para girar a 134 rpm (esse parâmetro pode ser configurado através do controle manual acoplado ao conversor de frequência, descrito anteriormente).

3.4.2 Cálculo das especificações mínimas do motor

Basicamente, de modo a atender a demanda das pesquisas, a centrífuga deve ser capaz de produzir +15Gz, sem perder o alinhamento do eixo central. Além disso, deve permitir, simultaneamente, a acomodação de um grande número de amostras. Para isso, foi necessário calcular a potência do motor. Antes, porém, foi calculado o torque e o momento de inércia gerado no braço da centrífuga. Pela equação 2, adotando-se a massa da bandeja de 1,2 kg e diâmetro de 0,66 m obteve-se 0,17 kg.m² como momento de inércia.

A frequência de rotação é conhecida (134 rpm), que equivale a uma velocidade angular de 14,346 rad/s (calculado no item 4.4.1); o tempo esperado para que o motor atinja essa rotação foi escolhido arbitrariamente em 5 s (esse parâmetro, conhecido como rampa de aceleração, pode ser programado no painel do conversor de frequência). Aplicando-se esses valores na equação 3, juntamente com o momento de inércia de 0,17 kg.m², foi obtido 3,12 N.m, que representa o torque mínimo que o motor deve possuir. De posse do torque, a potência foi calculada pela equação 4, obtendo-se 53,38 W. Então, através destes cálculos, comprovou-se que o motor deve apresentar um torque mínimo de 3,12 N.m e potência mínima de 53,38 W de modo a satisfazer as necessidades operacionais.

3.5 Problemas de Engenharia

Em diversas situações, as necessidades do estudo determinaram as escolhas; em outras, foi a disponibilidade de recursos ou a necessidade de se adaptar à infra-estrutura existente no local de trabalho. Independentemente de qual condição, a tabela 1 apresenta os problemas de engenharia enfrentados e as soluções alcançadas, justificando suas razões.

Tabela 1 – Principais problemas de engenharia durante a execução do projeto

Problema de Engenharia	Solução	Justificativa
Qual o melhor local para fixação dos componentes eletrônicos?	Todos os componentes eletrônicos foram fixados na bandeja superior da centrífuga, tomando o cuidado de manter o balanceamento de massa entre dois pontos equidistantes ao centro e opostos	Nesse local, há maior espaço útil e exposição, facilitando a fixação e manutenção dos mesmos. Além disso, eles encontram-se posicionados mais próximos à extremidade superior do eixo central, por onde foi feita a saída de sua fiação de alimentação elétrica. Isso facilitou a integração mecano-eletrônica.
Como garantir a estabilidade do eixo central?	Projetar uma base mais pesada em relação ao restante da estrutura	Esse procedimento abaixa o centro de gravidade; testes de estabilidade comprovaram a eficácia da técnica.
De que modo integrar a estrutura mecânica com a elétrica?	Projetar um eixo central oco, fabricado a partir de um tubo mecânico trefilado	O volume interno do eixo permite a passagem da fiação ao longo de toda a centrífuga
Como reduzir ao máximo o peso a ser fixado na parte superior da bandeja?	Colocar a fonte de 24 V na região externa e implementar um conector rotativo	A fonte, elemento mais pesado, pode provocar instabilidade caso ela seja colocada para girar junto com a centrífuga; o conector rotativo transmite seu sinal
Qual o melhor formato para a base da centrífuga?	Circular com pezinhos anti-vibração	Melhora o nivelamento, garante maior proteção anti-pó aos componentes internos, facilita a manutenção e transporte
Qual deve ser o diâmetro da centrífuga?	66 cm	Essa é a medida ideal para o equipamento se adequar às dimensões da bancada onde foi instalado
Que motor deve ser adquirido?	Motoredutor com 100 W de potência, flange e eixo oco	Cálculos provaram que, para a centrífuga gerar os +7Gz propostos, a potência do motor deve ter um mínimo de 53 W. Com um motor de 100 W, pode-se chegar a +15Gz, ampliando o leque de pesquisas; a flange facilita a fixação na base; o eixo oco facilita a integração com a correia de transmissão de força
Qual sistema de transmissão de força empregar?	Optou-se pelo sistema formado por polias e correia, ao invés de um acoplamento mecânico.	Esse sistema foi escolhido em função da velocidade desejada (máximo de 200 rpm); a potência a ser transmitida (máximo de 100 W); a distância entre os eixos (30 cm); as características da carga mecânica (leve). Uso típico para uma correia
Como transmitir um sinal elétrico de fora da centrífuga para um dispositivo que se encontra dentro, durante a rotação?	Conector rotativo	Idealizado para transmissão de sinal entre uma estrutura estática e outra dinâmica, sem perda de qualidade do sinal. Foi adquirido um de 2 polos, mais barato, apenas para transmitir o sinal da fonte de alimentação
Como otimizar a eficiência da transmissão do torque?	Construir uma chaveta no eixo central	Chavetas possibilitam melhor encaixe das polias, garantindo maior eficiência na transmissão da energia (reduz-se a dissipação energética)
Qual o sistema de transmissão de radiofrequência a ser	<i>Zigbee</i>	São fáceis de trabalhar, não existe a necessidade de uma configuração complexa, bastando a

empregado?		especificação de no mínimo dois valores (Endereço de destino, endereço da fonte). Por essa razão, ele é muito usado para fins acadêmicos. Para pequenas aplicações ele cumpre o papel de um cabo de comunicação serial. <u>Outras vantagens:</u> O baixo consumo do <i>zigbee</i> elimina a necessidade de uma bateria pesada acoplada ao projeto. <u>Desvantagem:</u> o seu conversor A/D trabalha com baixas frequências (1 Hz) e taxa de bits (10 bits), mas para a aplicação em questão é suficiente, pois os dados a serem transmitidos (temperatura, umidade e aceleração) não estão sujeitos a muitas variações de leitura.
Quais os material ideais para se empregar?	-Para as flanges: Alumínio; -Para o eixo central: aço 1045 -Para os recipientes: polipropileno -Para a base: aço 1020 -Para as bandejas: PVC rígido	- Diminui taxa de oxidação em contato com água que escorre, usada nas amostras; - Estrutura mais resistente e grande durabilidade; - Leve e baixíssimo custo; - Resistência mecânica e baixo custo; - Boa relação resistência mecânica/densidade; não oxida facilmente (contato com a água é frequente).
Qual a melhor forma para permitir o maior número de amostras ocupando o menor volume possível	Sem causar prejuízos à estabilidade do eixo, a solução encontrada foi a disponibilização dos recipientes de amostras em 3 níveis sobrepostos.	Com essa disposição de 3 níveis e PVC como material das bandejas, tem-se um total de 4,8 Kg de massa, não causando sobrecarga ao motor; a inclusão de mais níveis de mesmo raio aumentaria a chance dos níveis superiores flambarem
Como alinhar o ângulo de giro da minicâmera com os recipientes, durante a filmagem na centrífuga?	Foi construído um suporte em alumínio, bastante flexível, usado para fixar a câmera, que foi fixada de modo que seu permitiu liberdade de movimento de acordo com a força centrífuga recebida	Dessa forma, e após inúmeras regulagens e seguidos reposicionamentos, foi encontrado o ponto ideal de colocação da minicâmera, de modo que permitisse a filmagem tanto com a centrífuga em movimento quanto em repouso, de forma totalmente automática
Como resolver o problema de sintonia quando em máxima rotação?	Substituição da antena original da placa digitalizadora (Pixelview) por uma analógica modelo Indusat 3503	Antena substituta possui maior capacidade de amplificação do sinal, proporcionando um ganho maior em relação à antena originalmente usada. OBS: problemas com sintonia podem estar relacionados, também, com possíveis interferências eletromagnéticas no ambiente. Reposicionamentos da minicâmera também auxilia a contornar tais problemas.
Como minimizar a interferência de ruído no processo de transmissão de imagem?	Foi empregado um videocassete. Há outros recursos que cumprem a mesma função, mas esse foi o de mais baixo custo e maior disponibilidade	O dispositivo permite que a faixa de frequências da transmissão do sinal da imagem enviada pelo <i>Videolink</i> não tenha interferência de ruído quando disponibilizada para a porta serial do computador, porque ele mantém o sinal dentro de uma faixa constante de frequências.

Fonte: o autor (2012).

Na sequência, a tabela 2 apresenta os principais itens adquiridos, explicando o motivo de terem sido escolhidos. A viabilidade econômica da maioria dos itens (mesmo que necessitando de algumas adaptações para atenderem plenamente os objetivos do trabalho) foi, na maioria dos casos, o principal critério de seleção (estes estiveram, sempre, intimamente ligados aos recursos físico-financeiros disponíveis).

Tabela 2 – Principais itens e componentes selecionados durante a execução do projeto

Item	Por que foi Selecionado
Placa Digitalizadora	Permitir o rápido e eficaz processamento de imagens captadas pela câmera de vídeo do sistema de controle, simplificando o processo
Fonte 24V e 1 Fonte 12V	Atende as necessidades do projeto por um menor custo
Acelerômetro	Atende as necessidades do projeto por uma melhor relação custo-benefício Permitir a leitura de acelerações de até +18Gx e +18Gy
Conector Rotativo e terminais para soldagem	Adaptação na estrutura passou a exigir apenas 1 conector, atendendo as necessidades do projeto por um menor custo
Sistema de transmissão composto por 2 polias, correia, retentor, peça reguladora, rolamentos e redutores.	Elaboração de sistema de transmissão de força, gerada pelo motoredutor, para o eixo central de rotação
Sistema de captação de vídeos, transmissão de dados e alimentação de componentes composto por: 2 minicâmeras de TV, Transmissor de TV e placa digitalizadora de vídeo 2 minicâmeras TV, Transmissor e Receptor de TV, 2 placas <i>zigbee</i> e placa reguladora de tensão	<ul style="list-style-type: none"> - A minicâmera de TV adicional fez-se necessária para a filmagem simultânea das amostras do teste e as amostras de controle. - O sistema de transmissão e recepção de dados é estável, diminuindo a probabilidade de gerar ruído no sinal, e atendendo as necessidades do projeto a um menor custo. - A placa reguladora de tensões foi criada para ajustar a alimentação dos componentes eletrônicos.
HD Externo 500 Mb	Necessidade de maior capacidade de armazenamento de dados de filmagem
Temporizador	Programação automática do protocolo de coleta de dados, através do corte e ativação da energia elétrica, possibilitando a inclusão de horários pré-agendados
1 Fonte 24V e 1 Fonte 12V	Atende as necessidades do projeto por um menor custo
Conector Rotativo - 2 unidades 1 unidade e terminais para soldagem	Adaptação na estrutura passou a exigir apenas 1 conector, atendendo as necessidades do projeto por um menor custo
Sistema de transmissão composto por 2 polias, correia, retentor, peça reguladora, rolamentos e redutores.	Elaboração de sistema de transmissão de força, gerada pelo motoredutor, para o eixo central de rotação
HD Externo 500 Mb	Necessidade de maior capacidade de armazenamento de dados de filmagem

Fonte: o autor (2012).

4 VALIDAÇÃO

Este capítulo apresenta a metodologia de validação da Centrífuga V2. Para isso, foram realizados testes de integridade mecânica e experimentos planejados através de um estudo de caso, de modo a demonstrar e comprovar o funcionamento íntegro do equipamento de acordo com suas funções propostas.

4.1 Estudo de Caso

O número de Força G empregado, como referência, foi de +7Gz. Esse valor foi escolhido por dois motivos:

- é um valor de operação médio entre a capacidade mínima e máxima da centrífuga;
- para buscar a reprodutibilidade do experimento empregado como referência ao estudo de caso, descrito no trabalho de RUSSOMANO *et al*, 2007 (+7Gz foi o valor empregado naquele estudo).

A frequência de rotação da centrífuga V1, por apresentar raio de 0,28 m, corresponde a uma frequência de rotação de 137 rpm, enquanto que a centrífuga V2, que possui 0,33 m, corresponde a uma frequência de rotação de 134 rpm.

Comparou-se, paralelamente, os crescimentos de amostras vegetais produzidas pelas Centrífugas V1, V2 e as do Controle. Foram realizados experimentos em triplicata (Experimentos I, II e III). Empregou-se um total de 2430 sementes de rúcula (*Eruca sativa* Mill.). Em cada experimento, 810 sementes foram distribuídas igualmente entre três grandes grupos: grupo Controle, grupo Centrífuga V1 e grupo Centrífuga V2. A tabela 3 apresenta a divisão dos agrupamentos e seus respectivos ensaios.

Tabela 3 - Sistematização dos protocolos empregados no estudo de caso

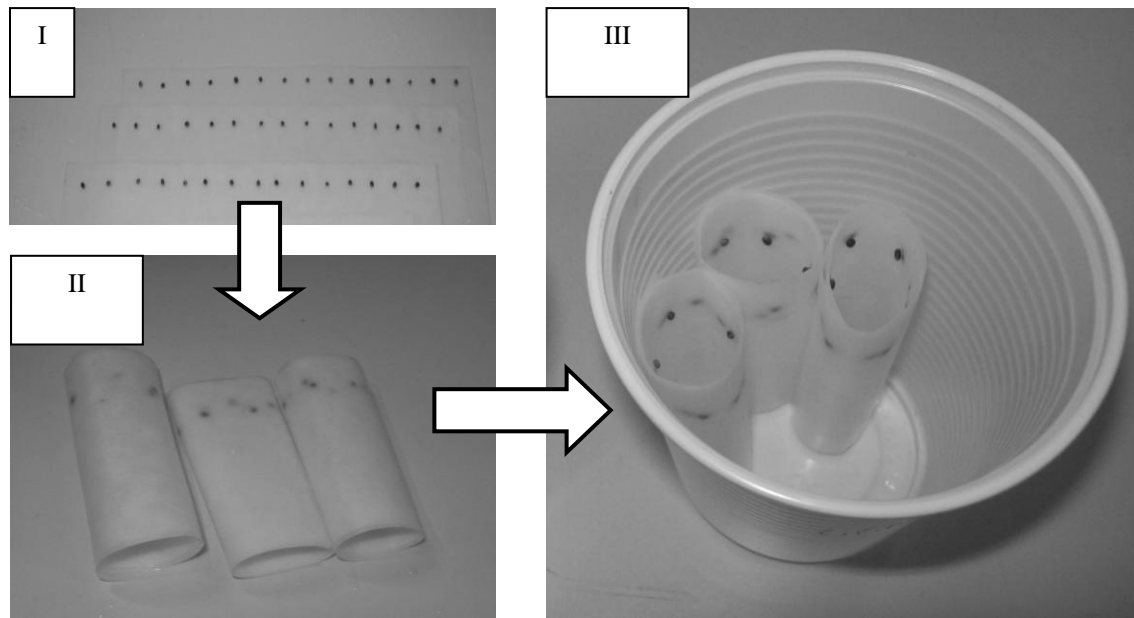
Grupo	Protocolo do Ensaio
Controle	96 h de experimento a +1Gz
Centrífuga V1	4 séries de 8 h de estímulo a +7Gz, com intervalos de 16 h (totalizando 96h) a +1Gz
Centrífuga V2	4 séries de 8 h de estímulo a +7Gz, com intervalos de 16 h (totalizando 96h) a +1Gz

Fonte: Russomano *et al.* (2007).

O protocolo de ensaio das amostras do grupo Controle é diferente, em relação aos demais grupos, porque estas não foram submetidas ao estímulo da hipergravidade, tornando-se, assim, um artifício de comparação.

Espera-se crescimentos médios semelhantes entre os grupos Centrífuga V1 e V2, assegurando a reprodutibilidade do processo. Da mesma forma, espera-se que ambas produzam plântulas maiores em relação às do grupo Controle. Em cada experimento, as sementes foram divididas em 18 recipientes. Cada grupo recebeu seis recipientes (totalizando 270 sementes) (Figura 40).

Figura 40 – Esquema de preparação dos recipientes de amostras



Na etapa (I), 45 sementes foram dispostas de forma alinhada em três fileiras de 15 sementes sobre papéis brancos de germinação; na etapa (II), os mesmos foram dispostos em forma cilíndrica, mantendo as sementes em sua borda superior; na etapa (III), os três rolos são condicionados dentro do recipiente de amostras, recebendo 80 ml de água.

Fonte: o autor (2012).

Para a eclosão, as sementes utilizam a água adicionada ao recipiente. Com a rotação, as centrífugas produziram uma aceleração centrífuga resultante (ac) de $+7Gz$, equivalendo a uma rotação de 137 rpm na Centrífuga V1 e 134 rpm na Centrífuga V2, obtidos pela equação 8. Essas frequências de rotação assumiram valores diferentes porque os raios das centrífugas são levemente diferentes (0,28 m e 0,33 m, respectivamente). Porém, a Força G resultante de $+7Gz$ é igual em ambas.

Cada experimento teve duração de quatro dias. Ao final, foi verificado o crescimento vegetal através da medição do comprimento das raízes e da parte aérea, usando-se um paquímetro mecânico universal, modelo Mitutoyo 300 mm x 0,02 mm (MITUTOYO, 2011).

A comparação dos resultados obtidos entre os três grupos foi realizada empregando análise da variância (ANOVA) e estatística descritiva (média aritmética e desvio padrão).

4.2 Validação de Equipamentos

Após a construção de determinado equipamento, deve-se realizar procedimentos de avaliação que testem seu desempenho, demonstrando sua confiabilidade e o correto funcionamento em relação ao que foi proposto. Normalmente, é classificada como a última etapa do processo de desenvolvimento de um produto.

É dito que uma máquina, equipamento, *software* ou processo é considerado validado se, estatisticamente, eles garantam que os resultados gerados a partir de seu emprego serão confiáveis (ISO, 2006).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a *International Standards Organization* (ISO) definem normas técnicas para padronização e especificação de projetos, testes e validações para diversos produtos e processos. Entretanto, não há documento específico para testes em centrífugas de plantas.

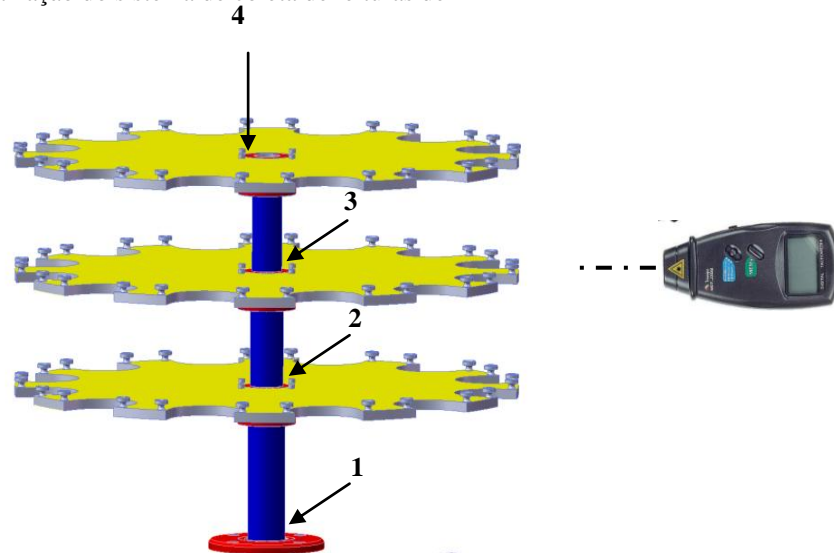
Porém, a norma ABNT 17025 estabelece recomendações básicas para os sistemas de informática e eletrônica de aquisição de dados, bem como as calibrações dos instrumentos de medição. Sensores de pressão e temperatura devem ser selecionados, instalados, calibrados e usados de maneira a garantir que a exatidão seja mantida. Quando são utilizados computadores ou equipamento automatizado para aquisição, processamento, registro, relato, armazenamento ou recuperação de dados, o laboratório deve assegurar que o *software* de computador desenvolvido pelo usuário esteja documentado e que sejam implementados procedimentos para a proteção dos dados (ABNT, 2001).

4.2.1 Validação da estabilidade do eixo central

A estabilidade da centrífuga foi verificada através de medições com um tacômetro de foto/contato digital, modelo Minipa MDT-2238A, realizadas em quatro diferentes alturas do eixo central (Figura 41). Realizaram-se três testes de 8 horas contínuas, em dias independentes e foram feitas medições nos quatro pontos a cada hora. O primeiro teste foi realizado a 20 rpm (baixa rotação); o segundo, a 134 rpm (a velocidade com que foi conduzido o estudo de caso); e o terceiro teste foi realizado a 200 rpm (rotação máxima). Esse procedimento foi adotado para assegurar que a centrífuga gerasse uma rotação estável e

homogênea em três diferentes faixas de velocidade. Todos os testes foram realizados com os recipientes de plantas, simulando uma situação real encontrada durante um experimento.

Figura 41 – Esquemática do sistema de coleta de leituras de RPM



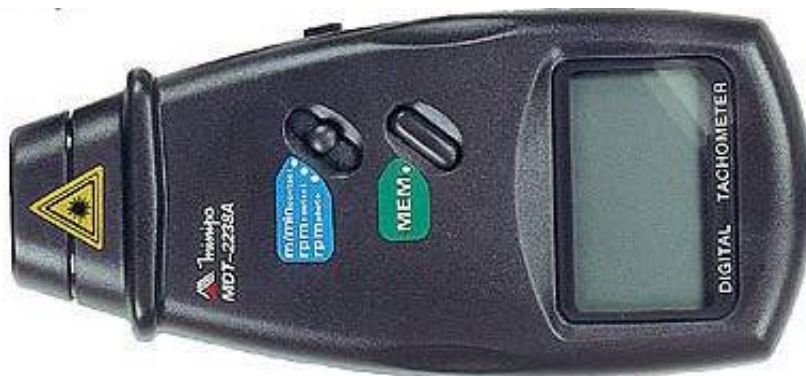
As setas indicam os pontos do eixo central onde foram realizadas as medições com tacômetro (representadas pelos algarismos de 1 a 4). À direita da figura, o tacômetro de foto/contato usado. Nos pontos de 1 a 3 foram realizadas medições ópticas, através de um laser refletido em fitas refletoras aderidas à superfície do eixo. No ponto 4, especificamente em função de sua localização, a medida foi feita pela técnica de contato.

Fonte: o autor (2012).

A comparação dos resultados obtidos entre os quatro pontos foi realizada empregando análise da variância (ANOVA) e estatística descritiva (média aritmética e desvio padrão).

O tacômetro tem a capacidade de realizar medições através de leitura por contato, fotoeletrônico, laser, RPM ótico ou medidas de velocidade na superfície (figura 42) (MINIPA, 2011).

Figura 42 – Tacômetro empregado



Fonte: Minipa (2011).

4.2.2 Validação do sistema de filmagem

Um recipiente de amostras da Centrífuga V2 e do Controle foram filmados durante os quatro dias, em cada um dos três experimentos. Dessa forma, foi produzido um interessante material.

Para questões de engenharia, serviu como testes de validação do sistema e de seus vários componentes, responsáveis pela captação e transmissão das imagens; para questões ligadas à ciência da Biologia Espacial, o sistema foi útil para determinar o instante em que ocorrem dois fenômenos do desenvolvimento vegetal: a eclosão das sementes e a formação dos cotilédones. Posteriormente, foram calculados os instantes médios que ocorreram tais fenômenos.

Também foi realizado um processamento nessas imagens, através do *software* Adobe Premiere Pro CS5.5.

4.2.3 Validação da transmissão dos sensores

Paralelamente aos experimentos, também foram realizados testes de transmissão de dados com os sensores RHT e acelerômetro. Verificou-se a integridade desses dados, registrando-se uma amostra durante os primeiros 3 minutos de funcionamento da Centrífuga V2.

5 AVALIAÇÃO

Este capítulo aborda os resultados e discussões, obtidos a partir das especificações atribuídas à centrífuga. De forma mais específica, é apresentado:

- um comparativo entre as Centrífugas V1 e V2, mostrando as principais diferenças resultantes;
- a obtenção final do aparelho, em seus aspectos construtivos e eletrônicos;
- os resultados dos testes de validação de desempenho, do sistema de filmagem e da transmissão de dados dos sensores, bem como dos experimentos realizados no estudo de caso;

5.1 Aspectos Construtivos

Tendo como referência a Centrífuga V1, empregada no trabalho de RUSSOMANO *et al.*, 2007, o novo equipamento demonstrou diversas vantagens mecânicas. As bandejas não apresentaram flambagem, ou seja, mantiveram-se planas durante todo o experimento. A construção de uma base de maior massa em relação ao restante da estrutura (de modo a baixar o centro de gravidade) assegurou boa estabilidade mecânica e leituras semelhantes de rotação em diferentes alturas do eixo. Da mesma forma, o material empregado nas bandejas garantiu boa relação entre resistência/peso, assegurando ótima eficiência energética.

A Centrífuga V1, apesar de apresentar o mesmo número de bandejas e recipientes em relação à Centrífuga V2, não garante o eficaz uso da estrutura completa, uma vez que a instabilidade é muito alta na medida em que se aproxima da extremidade superior do eixo central. A tabela 4 apresenta um comparativo da estrutura geral e dos recursos entre as duas centrífugas.

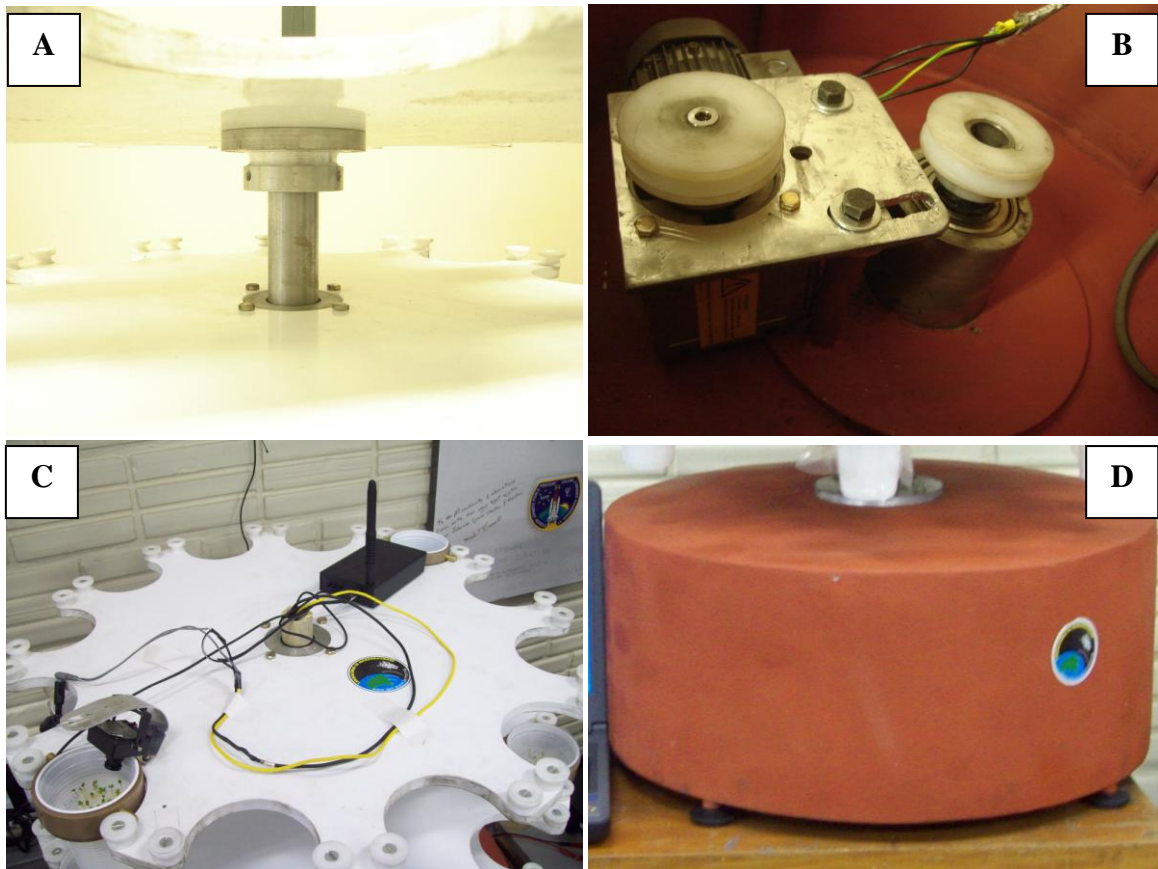
Tabela 4 - Fichas técnicas das duas Centrífugas, apresentando as principais diferenças entre ambas. As vantagens obtidas com a Centrífuga V2 justificam a importância de seu desenvolvimento.

Característica	Centrífuga V1	Centrífuga V2
Número de Bandejas	3	3
Número de recipientes	36	36
Hipergravidade Máxima obtida	+7Gz (137 rpm)	+15Gz (200 rpm)
Material das Bandejas	Polipropileno	PVC rígido
Material do eixo	Polipropileno	Aço 1045
Material da Base (Geometria)	Aço 1020 (retangular aberta)	Aço 1020 (circular fechada)
Sistema de Força	Motor DC + redutor	Motoredutor trifásico
Transmissão	Por engrenagens	Por correia e polias
Diâmetro Bandejas	560 mm	660 mm
Monitoramento Eletrônico	não há	Sensor RHT Acelerômetro Circuito de TV

Fonte: o autor (2012).

A figura 43 apresenta o aspecto final dos principais componentes construídos.

Figura 43 – Resultado construtivo das partes estruturais da centrífuga



(A) flanges de fixação em alumínio e detalhe do eixo central; (B) polias de transmissão de torque, motoredutor, fiação de entrada, rolamentos e estrutura para regulagem de correia, localizados no volume interno da base de proteção; (C) bandeja superior e saída da fiação elétrica; (D) base de proteção em aço 1020.

Fonte: o autor (2012).

Complementarmente, o Apêndice A documenta os desenhos técnicos detalhados dos componentes do projeto mecânico.

5.2 Aspectos Eletrônicos e Integração

Provavelmente, o maior desafio tenha sido a integração entre os sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos. As figuras 44 e 45 apresentam aspectos finais da integração entre os diversos sistemas.

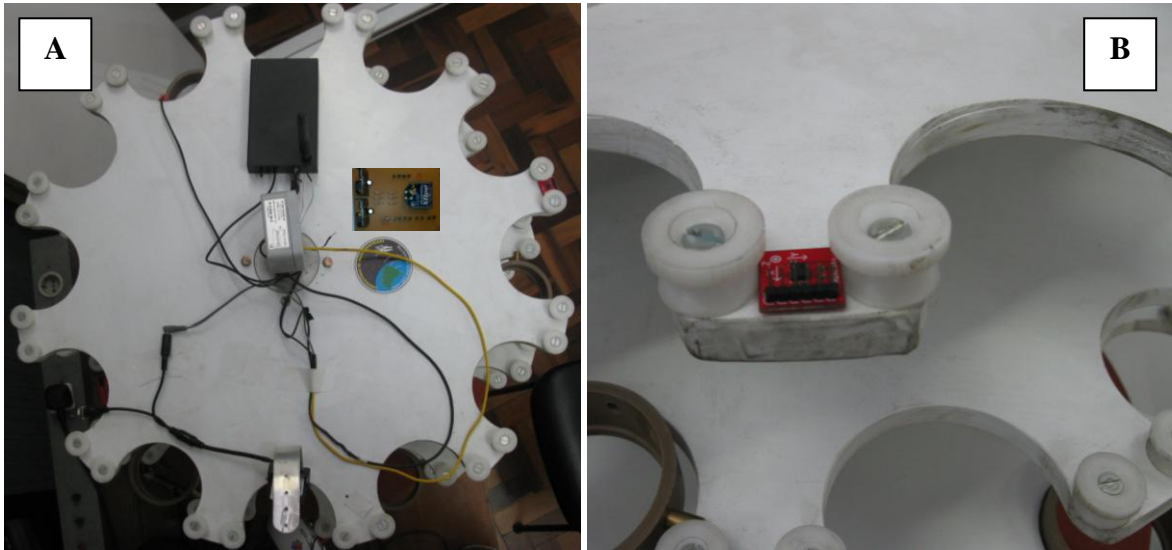
Figura 44 – Sistemas eletrônicos integrados à estrutura mecânica



(A) sistema de captação de imagens, disposto em um compartimento metálico; (B) programação de parâmetros do conversor de frequência, após ter sido conectado ao motoredutor; (C) sistema de ligações elétricas, com os temporizadores de cada centrífuga, ligados à rede elétrica; (D) componentes eletrônicos fixados na bandeja superior da centrífuga. É possível observar a fiação elétrica, conduzindo a corrente da fonte para alimentação dos componentes.

Fonte: o autor (2012).

Figura 45 – Vista superior da integração dos componentes fixados na bandeja superior



(A) Ao centro, fixado no eixo, tem-se o sensor RHT; na região periférica da bandeja, à direita, em vermelho, o acelerômetro; na parte inferior da imagem tem-se a minicâmera de TC fixada a seu suporte de alumínio; na parte superior, o transmissor de VHF e, próximo a ele, a placa reguladora de tensões, onde foi acoplado o Zigbee para transmissão de RF; toda a fiação elétrica atravessa a extensão interna do eixo central, saindo pela parte superior; (B) a imagem mostra o detalhe do posicionamento do acelerômetro.

Fonte: o autor (2012).

5.2.1 Placas e Sensores

Os primeiros testes de transmissão de sinais foram feitos manualmente, em uma placa *protoboard*. Foram instalados 4 potenciômetros, cada um promove a interpretação de um de um canal (sensor). Os potenciômetros enviaram sinais aos pinos do módulo transmissor remoto TX do *zigbee* que, por sua vez, reenvio a informação através de ondas de rádio para o módulo receptor RX do *zigbee*. O módulo *zigbee* transmissor for acoplado a um componente que faz o protocolo com a *protoboard*. Ao receber os sinais (indicado por um *led* central amarelo), o módulo receptor RX, acoplado a uma entrada USB de um microcomputador, envia a informação para ser decodificada por um sistema de *software*.

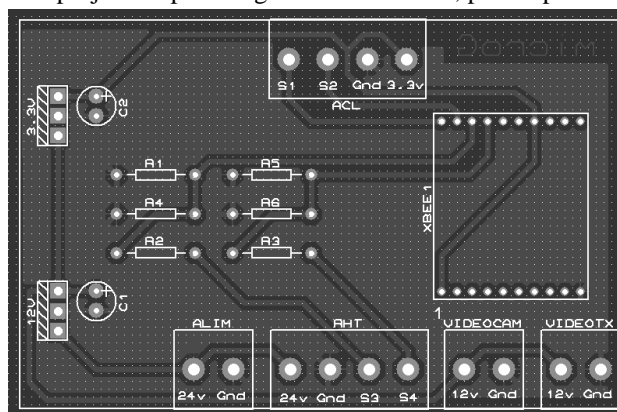
Os testes seguintes consistiram no emprego dos sensores em substituição aos potenciômetros. O acelerômetro foi instalado diretamente na *protoboard*, enquanto que o sensor de temperatura e umidade foi conectado aos pinos de módulo *zigbee* por meio de fios. As figuras 46 e 47 demonstram, respectivamente, o desenvolvimento dessa placa.

Figura 46 – Etapas do desenvolvimento do sistema de sensoriamento e da placa reguladora de tensão.



(A) primeiro teste de montagem do sistema de transmissão de sinais dos sensores, usando-se potenciômetros; (B) sinais sendo recebidos pelo programa desenvolvido; (C) segundo teste de transmissão do sinal, empregando os sensores propriamente ditos; (D) placa reguladora de tensões finalizada.
Fonte: o autor (2012).

Figura 47 – Concepção final do projeto da placa reguladora de tensão, pronta para ser impressa



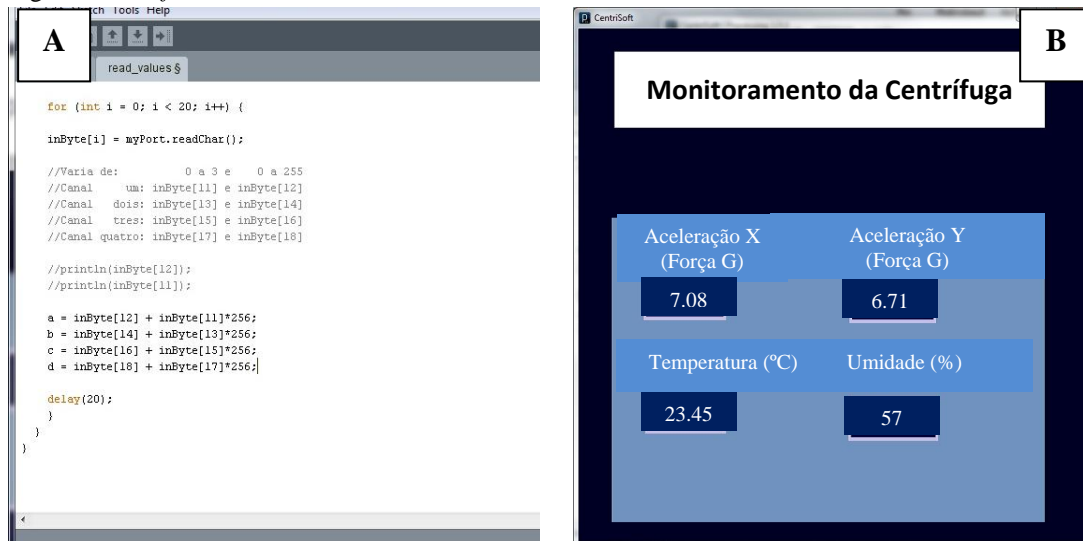
Fonte: o autor (2012).

Uma vez finalizada, a placa reguladora de tensões foi testada com o uso de um multímetro digital. As medições apontaram o resultado de tensão esperado para cada componente (ou seja, o valor especificado pelo fabricante), permitindo sua integração à centrífuga.

5.2.2 Software de Monitoramento

O *software* desenvolvido para a apresentação do sinal dos sensores mostrou-se eficaz e bastante iterativo, pois permite uma rápida visualização dos resultados (figura 48). O Apêndice C traz detalhadamente todo o código desenvolvido em plataforma *Processing*.

Figura 48 – *Software* desenvolvido



(A) os 10 bits transmitidos pelo *Zigbee* são selecionados e distribuídos aos quatro canais, de acordo com os comandos do código; na imagem, o editor de códigos *Processing*; (B) interface gráfica apresentando os valores do sinal dos sensores.

Fonte: o autor (2012).

5.3 Transmissão de Dados dos Sensores

Uma vez pronto o sistema de sensoriamento, iniciou-se a coleta dos dados. Os processos de aferição dos instrumentos, a sincronização entre todos os sensores e placas. A tabela 5 apresenta a coleta de dados em um teste de aferição dos sensores, realizado durante um experimento do estudo de caso.

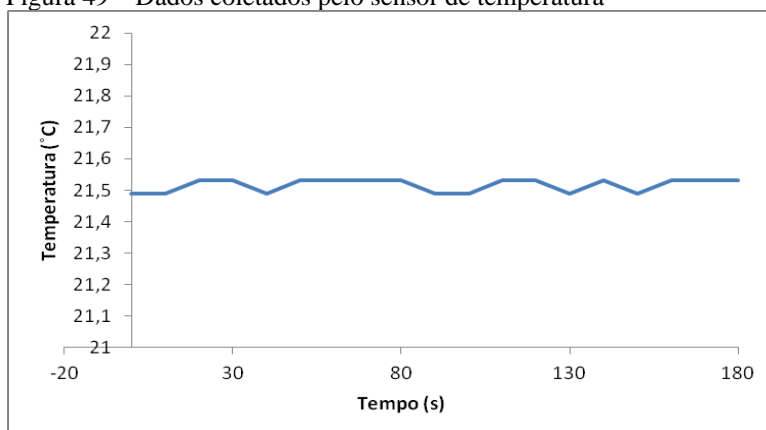
Tabela 5 – Amostra dos valores registrados pelo sistema durante os 3 primeiros minutos de experimento

Tempo (s)	Temperatura (°C)	Umidade (%)	a_{cx} (Força G)	a_{cy} (Força G)	a_{cr} (Força G)	Frequência de rotação (rpm)
0	21,49	56,79	0	0	0,00	0
10	21,49	56,76	4,83	4,65	6,70	112
20	21,53	56,73	5,06	5,11	6,89	132
30	21,53	56,73	4,90	5,12	7,08	135
40	21,49	56,73	5,08	5,12	7,21	133
50	21,53	56,73	4,94	5,09	7,09	134
60	21,53	56,73	4,82	5,05	6,98	134
70	21,53	56,73	5,18	5,10	7,26	134
80	21,53	56,73	4,79	4,92	6,86	134
90	21,49	56,73	5,16	4,94	7,14	134
100	21,49	56,73	5,04	5,19	7,23	134
110	21,53	56,73	5,16	4,81	7,05	134
120	21,53	56,70	4,90	5,14	7,10	134
130	21,49	56,73	5,08	5,18	7,25	134
140	21,53	56,71	4,93	4,94	6,97	134
150	21,49	56,73	4,77	4,77	6,74	134
160	21,53	56,73	4,71	5,00	6,86	134
170	21,53	56,72	5,04	5,00	7,09	134
180	21,53	56,73	4,88	5,00	6,98	134

Fonte: o autor (2012).

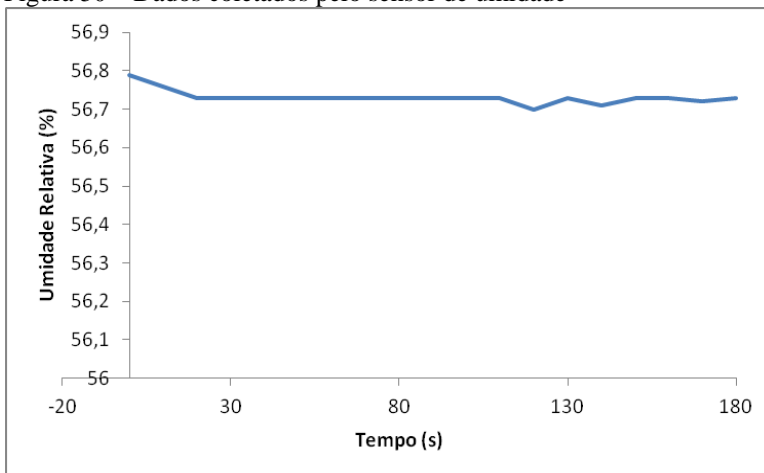
As figuras 49-52 apresentam os dados correlacionando cada sensor com o tempo.

Figura 49 – Dados coletados pelo sensor de temperatura



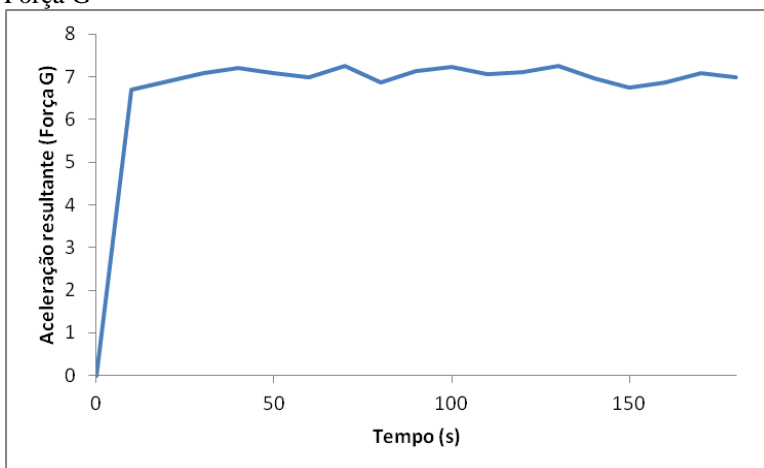
Fonte: o autor (2012).

Figura 50 – Dados coletados pelo sensor de umidade



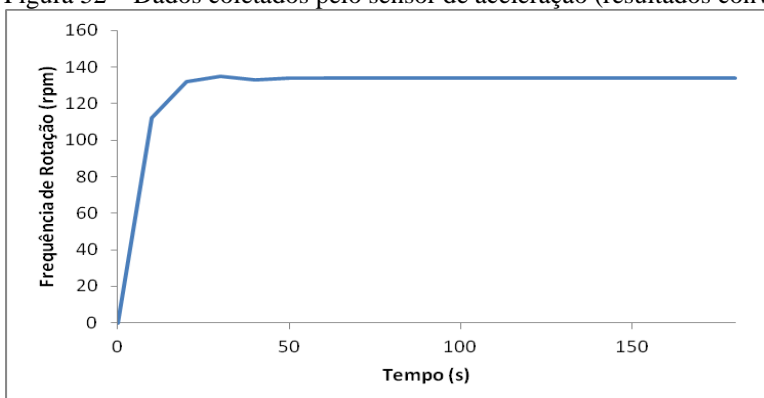
Fonte: o autor (2012).

Figura 51 – Dados coletados pelo sensor de aceleração, já tendo sido calculado o vetor resultante equivalente em Força G



Fonte: o autor (2012).

Figura 52 – Dados coletados pelo sensor de aceleração (resultados convertidos para rpm)



Fonte: o autor (2012).

Os dados da figura 49 apresenta uma leitura constante de temperatura, comprovando o correto funcionamento do sistema de transmissão de sinais do sensor. As leituras mostraram-se adequadas à realidade do ambiente, uma vez que a sala de experimentos manteve-se climatizada em aproximadamente 21,5 °C.

Os dados da figura 50 apresenta a correta transmissão do sinal do sensor de umidade, demonstrando a constância do ambiente em aproximadamente 56,7%.

Os dados da figura 51 apresenta as leituras do sensor de aceleração. As informações de velocidade para cada eixo (X e Y) levaram a uma resultante. Esse valor foi convertido para unidades de força G. No caso do experimento, cuja força G foi de +7Gz, o sistema apresentou a correta leitura, mostrando pequenas flutuações no valor, que se manteve praticamente constante ao longo da faixa de tempo amostral (3 minutos). A estabilização do valor ocorreu logo após 30 s, aumentando gradativamente de acordo com a rampa de aceleração programada.

Para comprovar as medições feitas diretamente com o acelerômetro, foram realizadas, também, medidas com o tacômetro digital. Comparando-se ambas, verificou-se valores com diferença bastante desprezível certificando, assim, os dados coletados pelo acelerômetro.

Os dados da figura 52 apresenta as leituras do sensor de aceleração em rotações por minuto (rpm). Nesse caso, a estabilização foi verificada também logo após 3 s, mantendo-se praticamente constante até o final do teste. O gráfico possui esse comportamento devido à frequência de amostragem na coleta de dados pelo *zigbee*, que é de 1 Hz, mas o importante é a região do gráfico relacionada ao regime (a constância); a rampa de aceleração não é relevante.

Esses testes tiveram como referência o trabalho de ROSA, 2007, que adotou um sistema de sensoriamento e condições semelhantes. Os resultados mostraram-se bastante coerentes.

5.4 Sistema de Filmagem

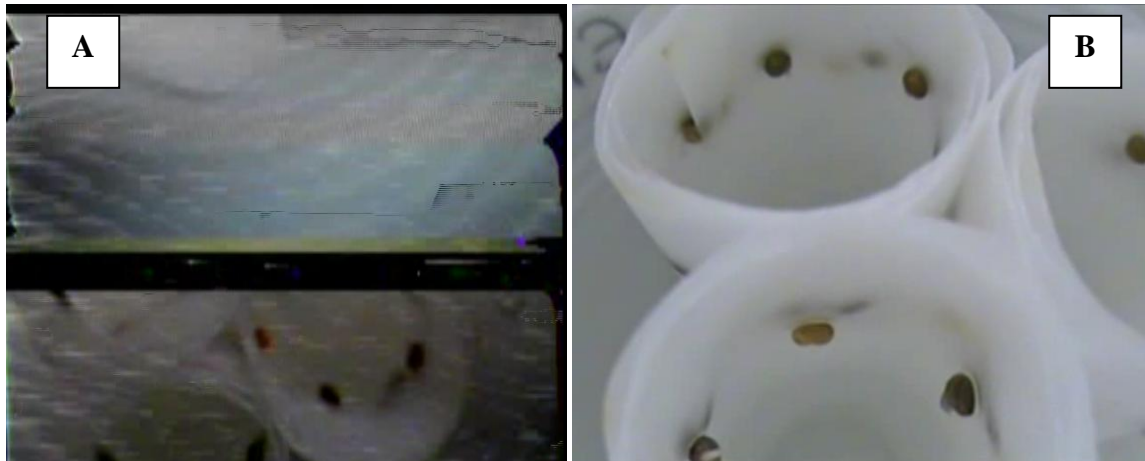
Do ponto de vista eletrônico, as imagens VHF geradas pelo sistema de filmagem instalado na Centrífuga V2 foram transmitidas sem ruído eletrônico, mesmo com o sistema em máxima rotação, comprovando o perfeito funcionamento de sistema como um todo.

Nos primeiros testes, porém, observaram-se variações de sintonia durante as transmissões em movimento. Isso foi resolvido ao substituir-se a antena original da placa digitalizadora por uma antena de maior capacidade de recepção de sinal.

Contudo, esse problema não foi verificado com as filmagens do grupo Controle, uma vez que não estão submetidas à rotação.

A figura 53 apresenta a diferença das imagens capturadas usando-se a antena original e a antena substituta.

Figura 53 – Sistemas paralelos de captação de imagens durante um dos experimentos



(A) imagem captada pela antena original *Pixelview* durante teste em máxima rotação (+15Gz); (B) imagem gerada durante teste, nas mesmas condições, empregando a antena substituta, modelo *Indusat 3503*.

Fonte: o autor (2012).

5.5 Avaliação da Estabilidade

Foram conduzidos como parte do procedimento para testar o desempenho da centrífuga, conforme especificado no item 4.5.1. A tabela 6 apresenta as médias encontradas 4 pontos aferidos, durante os 3 ensaios.

Tabela 6 – Média Aritmética (\pm desvio padrão) de 3 testes em diferentes velocidades e pontos do eixo (n = 8).

Teste	Velocidade			
	1	2	3	4
I (20 rpm)	20,11 \pm 0,32	20,91 \pm 0,88	21,03 \pm 1,23	21,43 \pm 1,72
II (134 rpm)	133,42 \pm 0,11	135,9 \pm 1,12	135,2, \pm 1,18	136,61 \pm 2,09
III (200 rpm)	200,35 \pm 1,54	202,71 \pm 1,03	205,01 \pm 2,57	205,29 \pm 4,53

Fonte: o autor (2012).

A análise de variância (ANOVA) comprova a estabilidade do eixo central da centrífuga, resultando em não significativo ($p > 0,05$). É interessante observar que os pontos mais próximos à base, entretanto, apresentaram valores mais próximo ao valor de velocidade pretendido, para os três testes realizados. Quanto mais longe da base está o ponto, maior a tendência que a média apresente um valor com maior variação em relação ao valor pretendido

de referência. Essa variação, porém, não é significativa.

5.6 Estudo de Caso

A figura 54 apresenta as Centrífugas V1 e V2 e o sistema de controle, com suas respectivas amostras, prontas para o experimento que testou seu uso e a funcionalidade dos sistemas desenvolvidos.

Figura 54 – As duas centrífugas preparadas para um dos experimentos do estudo de caso



(A) Grupo Centrífuga V2; (B) Grupo Centrífuga V1; a fileira de recipientes plásticos na frente são as amostras preparadas para o grupo Controle.

Fonte: o autor (2012).

As tabelas 7-9 apresentam as medições do experimento, realizado em triplicata. Para permitir uma ideia mais ampla, os resultados de todas as amostras da Centrífuga V2, encontram-se no Apêndice B.

Tabela 7 – Média das medições para cada recipiente nos experimentos para o grupo Centrífuga V1 a +7Gz

Recipiente	Raiz (cm)	Parte Aérea (cm)	Total (cm)
1	4,132	2,147	6,279
2	4,413	2,179	6,592
3	5,189	1,970	7,159
4	5,292	2,247	7,539
5	5,846	2,141	7,987
6	5,159	1,922	7,154
Média	5,0052	2,1011	7,1185

Fonte: o autor (2012).

Tabela 8 – Média das medições para cada recipiente nos experimentos para o grupo Centrífuga V2 a +7Gz

Recipiente	Raiz (cm)	Parte Aérea (cm)	Total (cm)
1	5,611	2,226	7,837
2	5,154	2,427	7,581
3	5,194	2,150	7,344
4	5,146	2,022	7,168
5	4,631	2,179	6,810
6	4,707	2,110	6,817
Média	5,0739	2,1855	7,2594

Fonte: o autor (2012).

Tabela 9 – Média das medições para cada recipiente nos experimentos para o grupo Controle a +1Gz

Recipiente	Raiz (cm)	Parte Aérea (cm)	Total (cm)
1	3,343	1,818	5,161
2	3,315	1,585	4,900
3	3,181	1,593	4,774
4	3,324	1,453	4,776
5	3,500	1,672	5,032
6	3,197	1,733	4,930
Média	3,3100	1,6422	4,9289

Fonte: o autor (2012).

A figura 55 apresenta um rolo representativo, mostrando como é o aspecto das plântulas crescidas após as 96 h de experimento.

Figura 55 – Um dos rolos de amostras aberto, usado na Centrífuga V2, demonstrando o aspecto das plântulas



Fonte: o autor (2012).

A tabela 10 apresenta as médias gerais para cada grupo, considerando todos os três experimentos.

Tabela 10 – Média aritmética (\pm desvio padrão) dos três grupos analisados, considerando o experimento em triplicata; Centrífuga V1 (n = 810); Centrífuga V2 (n = 810) e Controle (n = 810)

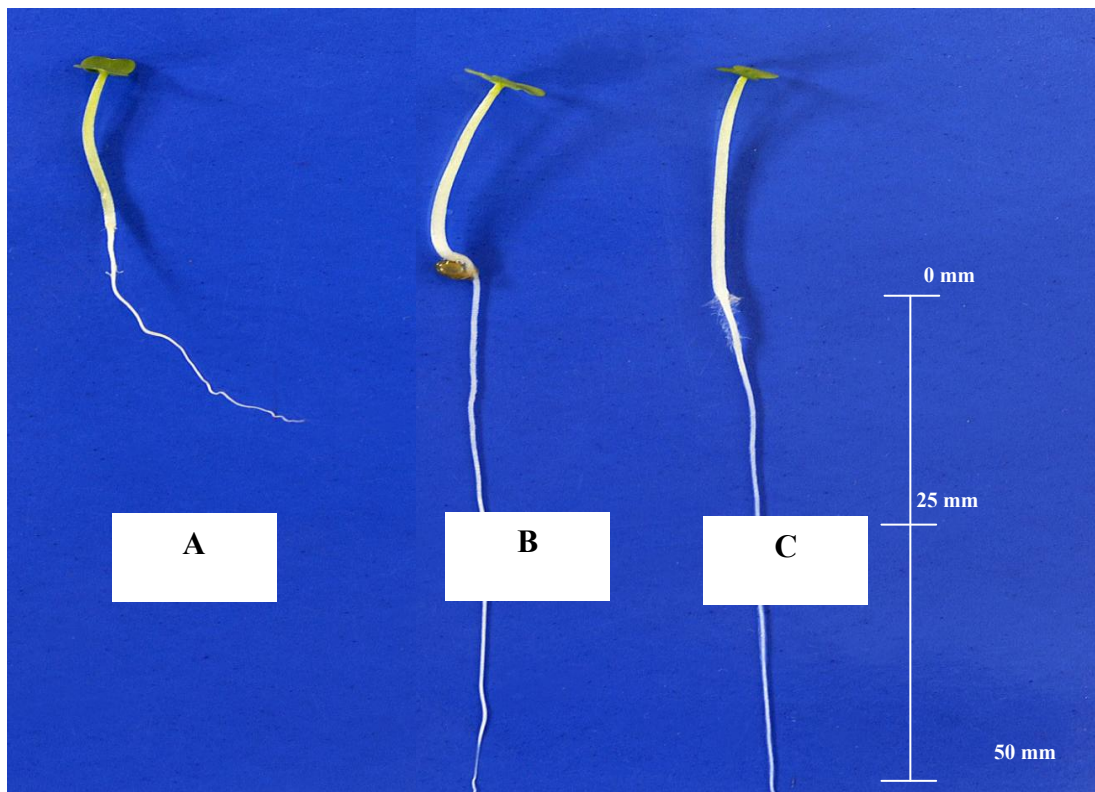
Grupo	Raiz (cm)	Parte Aérea (cm)	Total (cm)	Sementes germinadas
Centrífuga V2	5,07 \pm 1,32	2,18 \pm 0,88	7,25 \pm 2,23	13,94 \pm 3,09
Centrífuga V1	5,01 \pm 2,06	2,10 \pm 1,12	7,11 \pm 3,18	13,61 \pm 3,55
Controle	3,31 \pm 1,54	1,74 \pm 1,03	4,92 \pm 2,57	11,26 \pm 2,53

Fonte: o autor (2012).

O crescimento médio da parte aérea (parte mais relevante da planta) entre a Centrífuga V1 (2,10 \pm 1,12 cm) e a Centrífuga V2 (2,18 \pm 0,88 cm) não foi significativo ($p > 0,05$), comprovado pelo teste de variância ANOVA. Porém, ao comparar as centrífugas com o grupo controle (1,64 \pm 1,03 cm), os resultados foram significativos ($p < 0,05$). O mesmo resultado vale para a análise das raízes e do comprimento total das plântulas. Também foi observado um número maior de sementes germinadas entre as amostras que receberam o estímulo hipergravitacional.

Os resultados do crescimento médio das raízes, parte aérea e total apresentaram uma diferença de 1,18%, 3,66% e 5,2%, respectivamente. A figura 56 mostra um elemento amostral representativo para cada grupo.

Figura 56 - Exemplares cujas raízes resultaram muito próximas aos valores médios de seus respectivos grupos



(A) amostra do Controle; (B) amostra da Centrífuga V1; (C) amostra da Centrífuga V2.

Fonte: o autor (2012).

O estudo de caso adotado tem, como referência, os resultados obtidos em estudos anteriores realizados com a Centrífuga V1, construída pelo Centro de Microgravidade, publicados por RUSSOMANO *et al.*, 2007.

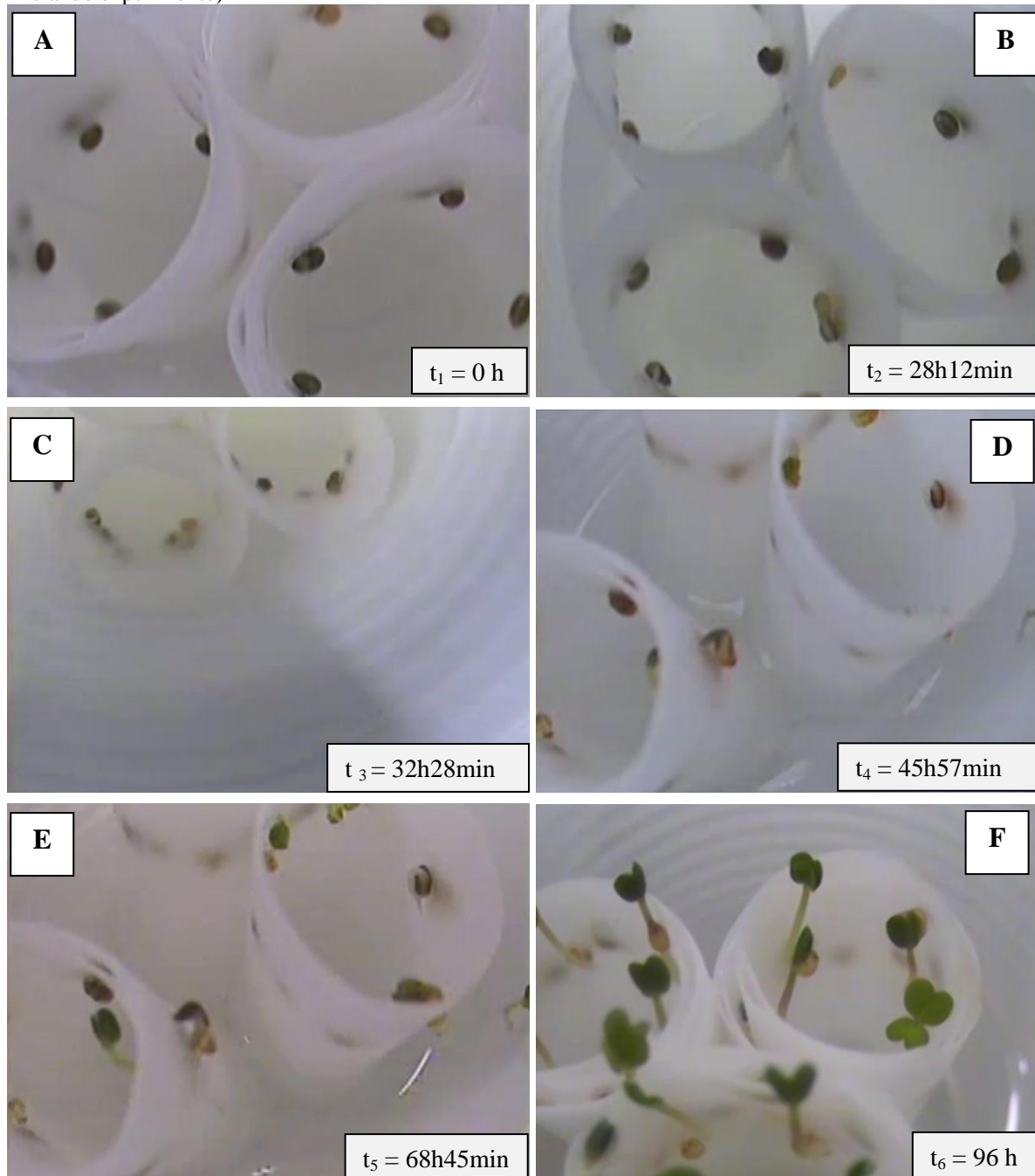
Comparando-se os dados da Centrífuga V2 com os obtidos naquele estudo, temos: média de 2,2 cm para as amostras estimuladas em hipergravidade (contra $2,18 \pm 0,88$ cm da Centrífuga V2); 1,8 cm para as amostras do controle (contra $1,74 \pm 1,03$ cm da Centrífuga V2) e 14 sementes germinadas (contra $13,94 \pm 3,09$ da Centrífuga V2).

5.6.1 Aplicação do Sistema de Filmagem

Também foram realizadas filmagens durante uma aplicação prática. Para isso, testes foram conduzidos em conjunto aos três experimentos do estudo de caso. Produziu-se, assim, um total de 96 horas (4 dias) de gravações em cada experimento, para a Centrífuga V2 e para o grupo Controle. Cada pacote de dados de 700 Gb, correspondente às 96 horas, foram submetidos a processamento de imagem, gerando arquivos de vídeo de 4 minutos. Através desse procedimento, é possível otimizar a análise dos principais fenômenos ocorridos durante o crescimento vegetal, bem como o instante em que ocorreram.

A figura 57 apresenta um exemplo de captação dessas imagens.

Figura 57 – Imagens geradas pelo sistema de captação de imagens VHF, mostrando as etapas de crescimento de amostras usadas na centrífuga V2 (cada imagem apresenta, em destaque, o tempo transcorrido desde o momento inicial do experimento)



(A) sementes em seus respectivos rolos, momentos antes de iniciar um dos experimentos; (B) instante da eclosão das primeiras sementes; (C) recebendo o estímulo da Força G; (D) início do desenvolvimento do proto-caule (E) formação dos primeiros cotilédones em algumas sementes; (F) plântulas formadas no final das 96 h.

Fonte: o autor (2012).

Com relação ao tempo de eclosão das sementes, o principal objetivo da criação do sistema, os resultados que o tempo de eclosão das sementes estimuladas pela hipergravidade é menor em relação às amostras do controle, bem como quanto à formação dos primeiros

cotilédones da plântula. A tabela 11 apresenta os resultados dos instantes de tempo em que ocorreram esses fenômenos.

Tabela 11 – Instantes de tempo médio de eclosão das três primeiras sementes e da formação dos primeiros três cotilédones das plântulas em um recipiente amostral

Experimento	Controle		Centrífuga V1		Centrífuga V2	
	Semente	Cotilédones	Semente	Cotilédones	Semente	Cotilédones
I	32,3	79,0	27,0	69,3	28,0	68,7
II	31,0	76,5	26,5	67,5	27,7	68,0
III	30,6	77,3	27,7	70,0	26,5	69,5
Média Total	31,3	77,6	27,1	68,9	27,4	68,6

Fonte: o autor (2012).

Observou-se, em comparação ao grupo Controle, uma nítida aceleração no desenvolvimento vegetal nas amostras testadas nos grupos Centrífugas V1 e V2. Analisando os valores médios, verifica-se que as sementes eclodiram com uma antecipação de aproximadamente 4 horas nas centrífugas. Já a antecipação da formação dos cotilédones foi de aproximadamente 11 horas.

A análise de variância (ANOVA) indicou diferença significativa nesses tempos de crescimento, tanto na comparação entre o grupo Controle e a Centrífuga V1, quanto entre o Controle e a Centrífuga V2 ($p < 0,05$). Porém, ao levarmos em consideração o comparativo entre as duas centrífugas, a diferença não é significativa ($p > 0,05$).

5.6.2 Comentários finais

O crescimento médio das raízes das plantas testadas com a Centrífuga V2 foi muito semelhante àqueles produzidos com a Centrífuga V1 e também aos resultados apresentados por RUSSOMANO *et al.*, 2007, comprovando a reprodutibilidade do processo científico elaborado.

Os resultados de desempenho e estudo de caso ajudaram a comprovar a integridade e importância da centrífuga para o avanço das pesquisas em hipergravidade. Tanto a estrutura quanto o sistema desenvolvido apresentaram-se bastante promissores no que diz respeito à aplicabilidade na área da biologia espacial.

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 do meio e à geração de imagens.

6 CONCLUSÕES

A centrífuga apresentou um bom desempenho mecânico e eletromecânico. A estrutura apresentou-se estável, garantindo uma distribuição homogênea da aplicação da força centrífuga em todas as amostras. Os sistemas e componentes comportaram-se de acordo com o previsto e satisfizeram os objetivos construtivos. O eixo central da centrífuga apresentou boa estabilidade.

A criação de uma base fechada assegurou uma maior proteção aos componentes eletromecânicos; as três bandejas sobrepostas permitiram testes com 36 recipientes de amostras simultaneamente. O sistema de geração e transmissão de força mostrou-se compatível com a potência projetada, tornando possível a produção de Força G de +15Gz;

O circuito eletrônico para regulação de tensões demonstrou sua eficácia conforme o previsto; a transmissão de ondas de radiofrequência foi eficaz, garantindo a integridade dos dados dos sensores; o *software* desenvolvido registrou corretamente os dados recebidos os sensores.

A implementação de um sistema de TV (em duplicata) para transmissão de VHF mostrou-se confiável, garantindo imagens de qualidade; tornou-se uma ferramenta útil para o estudo com plantas em hipergravidade; a integração entre os sistemas foi plena; a transmissão de dados dos sensores usando-se módulos *Zigbee* mostrou-se viável para a aplicação destinada nesse trabalho.

O sistema de filmagem mostrou-se útil para a determinação do momento de eclosão das sementes (por meio da geração e armazenamento de vídeos de elevada qualidade) e os sensores podem registrar e comprovar condições ambientais constantes; a alimentação da minicâmera fixada à bandeja superior da centrífuga por uma fonte externa (usando-se sistema de conexão rotativa) mostrou-se muito eficaz, uma vez que eliminou a necessidade de fixação da fonte na bandeja, garantindo a segurança.

6.1 Trabalhos Futuros

Sugere-se pesquisas com outras espécies vegetais, variando também as condições ambientais e a força G empregada, criando-se um protocolo de exposição a um gradiente de hipergravidades entre +1Gz e +15Gz.

Existe, ainda, a possibilidade de se implementar um sistema em malha fechada para controle da aceleração e força G .

7 REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 17025 – Requisitos gerais para competência de aquisição de dados, laboratórios de ensaio e calibrações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.
- ALEXANDER, C.K.; SADIKI, M.N.O. Fundamentos de Circuitos Elétricos. Porto Alegre: Bookman, 2003.
- ALONSO, M., FINN, E.J.: *Física – Um Curso Universitário: Mecânica*. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.
- ANALOG DEVICES. *Accelerometer Datasheet*, 2011. Disponível em <<http://www.hep.princeton.edu/~marlow/rts/Guides/ADXL321.pdf>> Acesso em agosto de 2011.
- AZEVEDO, D.F.G.; RUSSOMANO, T.; COELHO, R.P. *Development of educational tools to demonstrate the effects of hyper and microgravity on different test bodies*. 26th Annual Intern.Conf., IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), September 1-5. San Francisco, CA, EUA, 2004.
- BEER, F; JOHNSTON, E.R. *Mecânica Vetorial para Engenheiros*. São Paulo: Makrom Book, 692 p., 1991.
- BOTKIN, D.B.; KELLER, A. *Environment Science: Earth as a Living Planet*. New York: John Willey Professional, 423 p., 2006.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, I.G. *Introdução à Engenharia Ambiental*. São Paulo: Pearson/Pretice Hall, 312 p., 2004.
- CHEN, N; SIEGEL, S.M.; SIEGEL, B.L. *Gravity and Land Plant Evolution: Experimental Induction of Lignification by Simulated Hypergravity and Water Stress*. Life Sciences and Space Research, vol. 18, p.193-198, 1980.
- COELHO, R.P. *Desenvolvimento de centrífugas para experimentos em hipergravidade*. PUCRS, Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2005.
- COWING, K. *NASA hack space project: Student teams working on 'Spin Your Thesis!'*, disponível em <www.nasahackspace.org/2011/03/student_teams>. Acesso em 11 de dezembro de 2011.
- EN ISO 17665-1. *Sterilization of Health Care Products. Part 1: Requirements for the Development, Validation and Routine Control of a Sterilization Process for Medical Devices*, 2006.
- FIGUEIRA, D.G. *História*. 2 ed. São Paulo: Ed. Ática, 496 p., 2005.
- FITZELLE, K.S., KISS, J.Z. *Restoration of gravitopic sensitivity in starch-deficient mutants of Arabidopsis by hypergravity*. Journal of Experimental Botany. n. 52, p 265-275, 2001.
- GASPAR, A. *Física: Mecânica*. v. 1, 1ª ed., São Paulo: Ática, 2000.

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

HIBBLER, R. C. *Mecânica:Estática*. Rio Janeiro: LTC, 842 p.,1999.

KARP, G. *Cell and molecular biology: Concepts and experiments*, 4ª ed., Editora Von Hoffman, 2005.

KASAHARA, H.; SHIWA, M.; TAKEUCHI, Y. *Effects of hypergravity on the elongation growth in radish and cucumber hypocotyls*. Journal of Plant Research. Vol. 108, p. 59-64, 1995.

KINDERSLEY, D. *Visual Atlas: Plants and Earth*. Londres, 1993.

KISS, J.Z., EDELMANN, R.E.; GUISENGER, M.M.; KATEMBE, W.J. *Graviperception studies in biorack with wild-type and starch-deficient mutants of Arabidopsis*. Biorack on Spacehab, p. 205-219, ESA-SP-1222, 2002.

KRAFT, T.F.B.; VAN LOON, W.A. *Plastid position in Arabidopsis columella cells is similar in microgravity and on a random positioning machine*. Planta, n. 211, p. 415-422, 2005.

LINCOLN, T. *Fisiologia vegetal*. 3 ed. Porto Alegre: Ed. Artmed. 719 p., 2006.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. *Curso de Física*. 5ª ed. São Paulo: Scipione, 2000. 3v. v.1, p. 225.

MAXTREAM. *Xbee Datasheet*, 2011. Disponível em <<http://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Manual.pdf>> Acesso em agosto de 2011.

MESSIAS, A.R. *Controle remoto e aquisição de dados via XBee/ZigBee*. p.1-6, 2008. Disponível em <www.rogercom.com>. Acesso em 28 de maio de 2011.

MINIPA. *Tacômetros*, 2011. Disponível em <<http://www.minipa.com.br/modelos>> Acesso em outubro de 2011.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Produção integrada no Brasil: alimentos seguros*. Brasília, 1008 p., 2009.

MITUTOYO. *Mutimeters*, 2011. Disponível em <<http://www.mitutoyo.com/>> Acesso em setembro de 2011.

NASA AMES RESEARCH CENTER. *Research and Technology Report 2010*. Doc TM 110419, 262 p., 2010. Disponível em <[http://www.spaceref.com/directory/Astrobiology and Life Science/Gravitational Biology](http://www.spaceref.com/directory/Astrobiology%20and%20Life%20Science/Gravitational%20Biology)> Acesso em 21 de Agosto de 2011.

NORTON, R. *Machine Design: an Integrated Approach*. 2 ed. Prentice Hall, 2000.

NOVUS. *Manual de operação RHT-DM*. Disponível em <http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/5000230_v12x_manual_rht-portuguese.pdf> Acesso em agosto 2010.

PADULOSI, S.; PIGNONE, D. *Rocket: a Mediterranean crop of the world*. Report of a workshop. December, 1996, Padova, Itália, 27 p.

PROJETO EDUCAR- MECÂNICA GRÁFICA. 2009. Disponível em <<http://educar.sc.usp.br/fisica/indice.html>>. Acesso em 30 de outubro de 2011.

ROSA, M.M. *Desenvolvimento de um Sistema de Comunicação e Monitoramento de Centrífugas*, Dissertação de Mestrado – PUCRS: Porto Alegre, 2005.

ROSA, M.G. *Desenvolvimento de uma gôndola para realização de experimentos em uma centrífuga*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica). PUCRS. Porto Alegre, 2007.

RUSSOMANO, T.; FALCÃO, F.P.; SANTOS, M.A, et. al. *Process of growing plants under hypergravity conditions*. US Patent n. 2010/0180499 A1. Jul 22, 2010.

RUSSOMANO, T.; RIZZATTI, M.; COELHO, R.P.; et al. *Effects of simulated hypergravity on biomedical experiments*. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. March/April, 2007.

SARAIEGO, J.C. *Educação Ambiental: as ameaças ao planeta azul*. São Paulo: Scipione, 287 p., 2000.

SEW EURODRIVE. *Movitrac B - Operating Instructions*, 2011. Disponível em <<http://www.br.sew-eurodrive.com/download/pdf/16810813.pdf>> Acesso em agosto de 2011.

SEW EURODRIVE. *Manual de Motores e Motoredutores*, 2011. Disponível em <<http://br.sew-eurodrive.com/download/pdf/11358998.pdf>> Acesso em agosto de 2011.

SHENDER, B.S.; FORSTER, E.M.; HREBIEN, L.R. *Acceleration-Induced Near-Loss of Consciousness: The “A-LOC” Syndrome*, Aviation Space Environmet Medicine, v.74, n.10, p. 1021-1028, 2003.

SHENOI, B.A. *Introduction to digital signal processing and filter design*. Ed. Wiley, 423 p., 2006.

SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R.G. *Mechanical Engineering Design*. 7 ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

SMITH, J. *Plant growth and imaging in a hypergravity environment*. Space Book Reviews, 2011.

TAMAOKI, D.; KARAHARA, T.; NISHIUCHI, S. *Transcriptome profiling in Arabidopsis inflorescence stems grown under hypergravity in term of cells walls and plant hormones*. Advances in Space Research. Vol. 44, p. 245-253, 2009.

TAVARES, M.C. *Aquisição e processamento de sinais bioelétricos neurofisiológicos intraoperatórios*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2003.

TAVARES, A. *Fundamentos de projeto de placas e circuitos*. Pelotas: Educar, 342 p., 2000.

TIPLER, P.A.; MOSCA, P. *Física: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica*, 5a edição, São Paulo: LTC, 2006.

VERNIKOS, J. *Human physiology in space*. Bioessays. v.18, p. 1029 - 1037, 1996.

VIDYASAGAR, P.; JAGTAP, S.; NIRHALI, A. *Effects of hypergravity on the chlorophyll content and growth of root and shoot during development in rice plants*. Biomedical and Life Sciences. Vol. 24, p. 1599-1602, 2008.

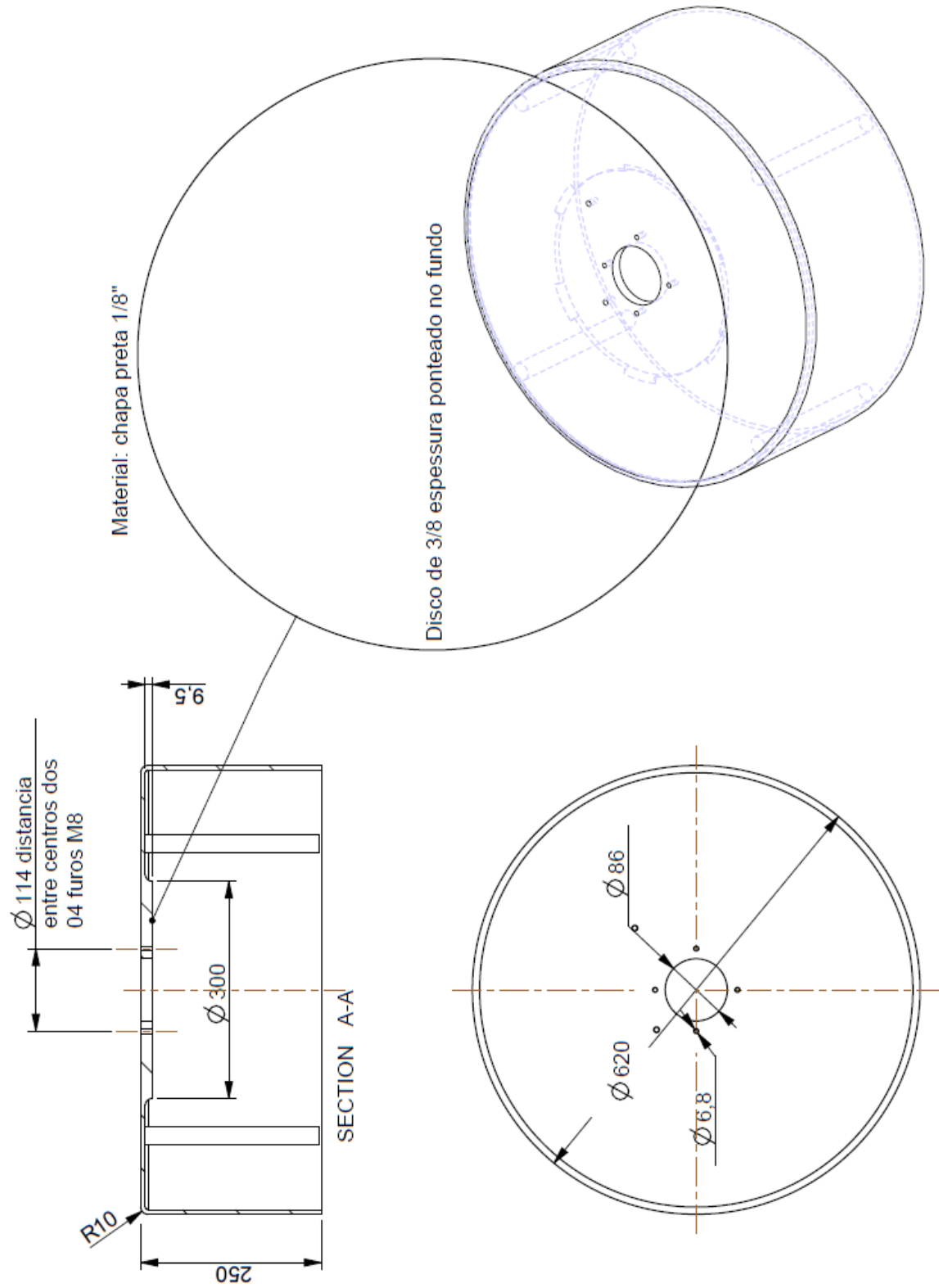
WAKABAYASHI, K; NAKANO, S; SOGA, K. *Cell wall-bound peroxidase activity and lignin formation in azuki bean epicotyls grown under hypergravity conditions*. Journal of Plant Physiology. Vol 166, p. 947-954, 2009.

WATANABE, E; NUTTI, MR. *Alimentos geneticamente modificados: avaliação de segurança e melhorias de qualidade em desenvolvimento*. Revista Brasileira de Milho e Sorgo. v. 1, n. 1, p.1-14, 2002.

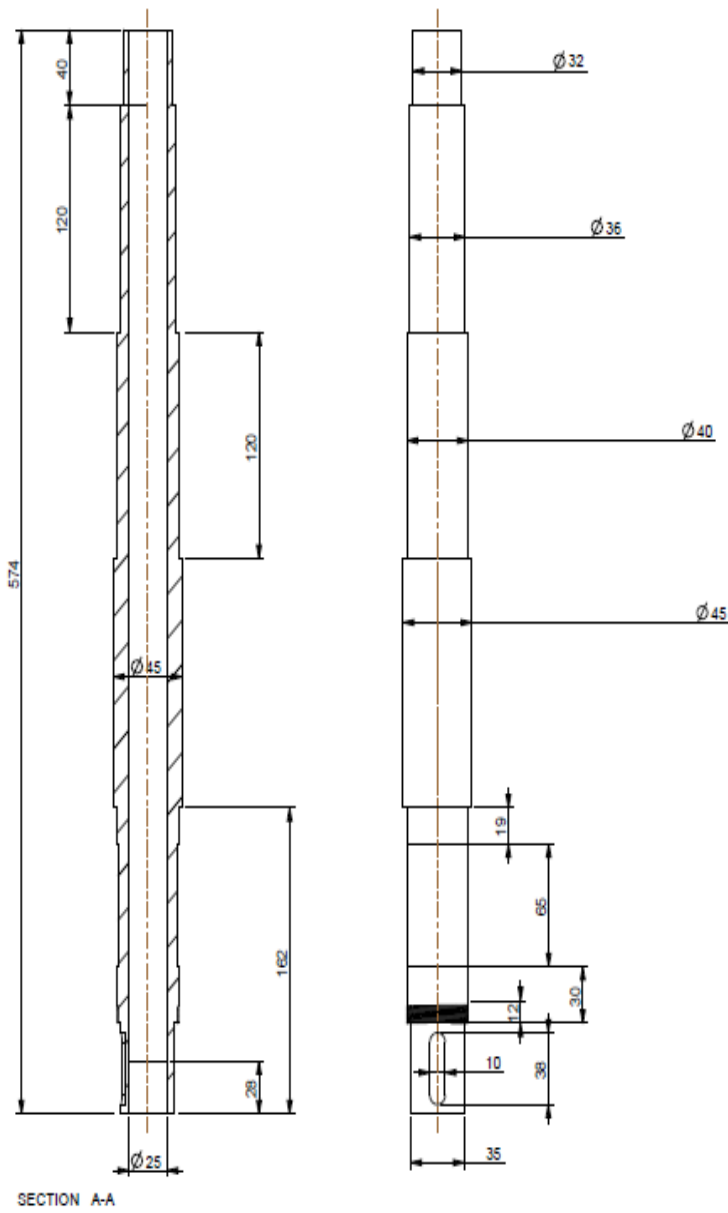
WHITE, W.J. *A History of the Centrifuge In Aerospace Medicine*. Santa Monica: Douglas Aircraft., 91 p., 1964.

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

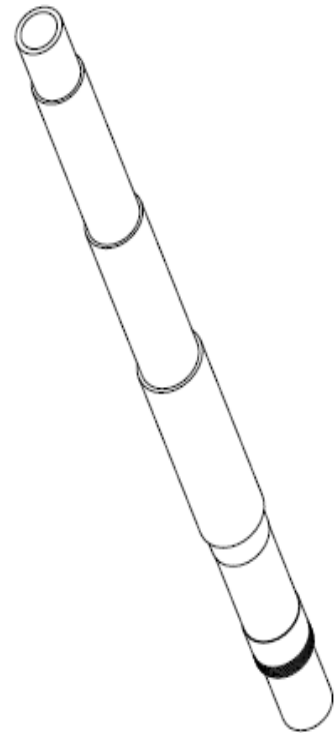
WUBBELS, R.J.; SONDAG, H.P.M.; VAN MARLE J. *Effects of hypergravity on the morphological properties of the vestibular sensory epithelium. I. Long-term exposure of rats after full maturation of the labyrinths*. Brain Research Bulletin, v. 57, n.5, Elsevier Science, p. 677-682, 2002.

APÊNDICE A – Desenhos do projeto mecânico da Centrífuga V2.**Base Metálica**

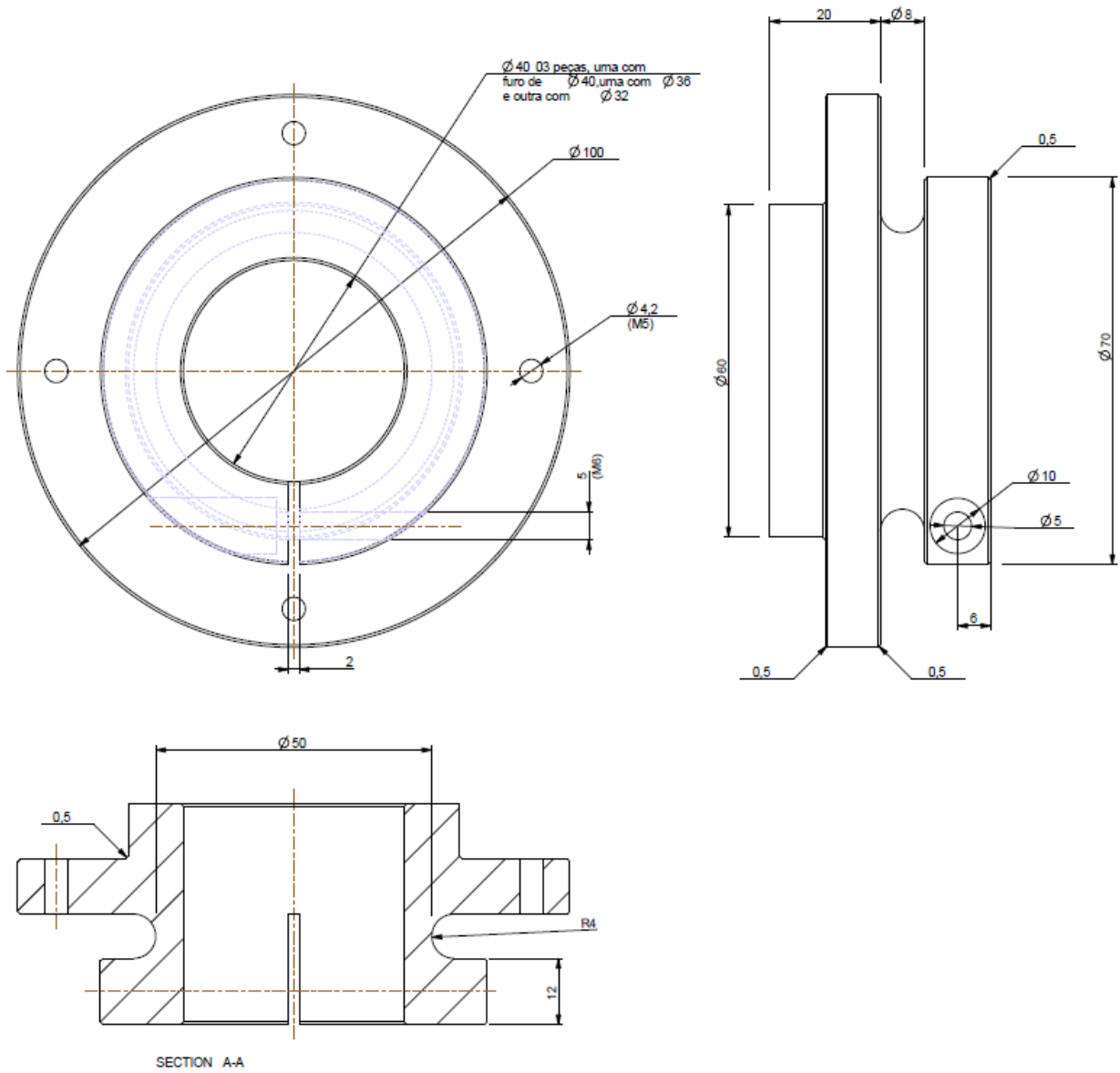
Eixo Central



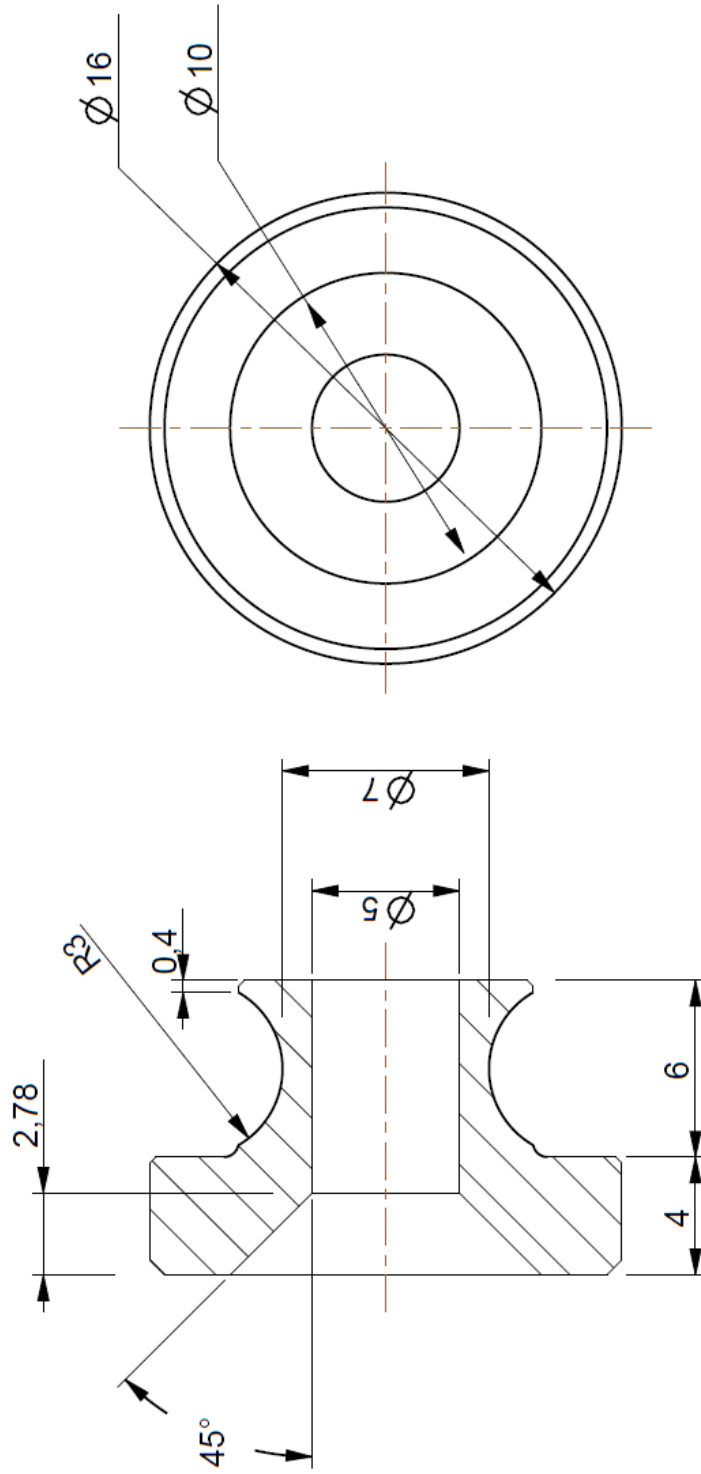
Tubo mecânico de aço 1045 ou VB40 $\phi 50 \times 25$



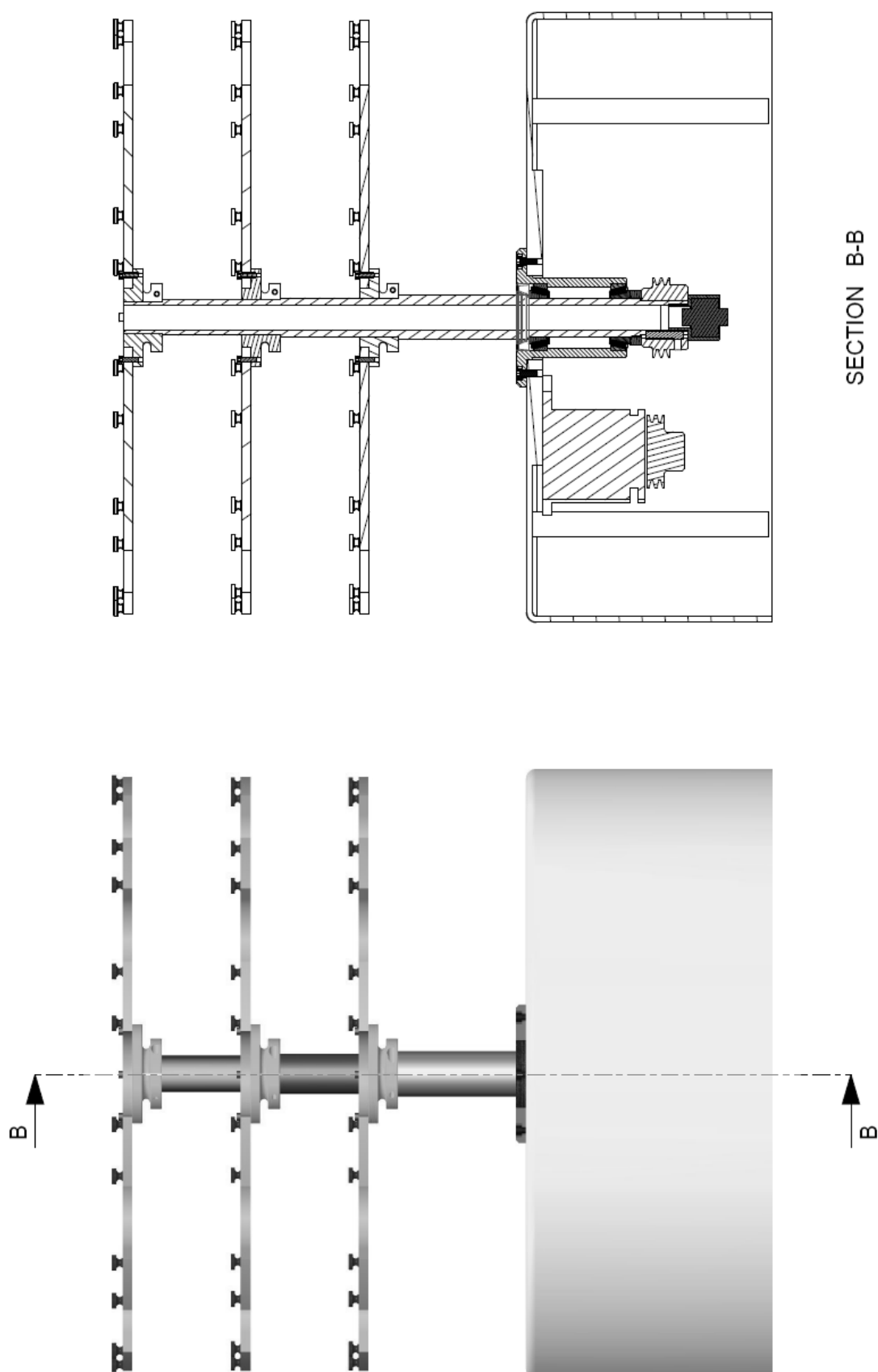
Flanges de Fixação

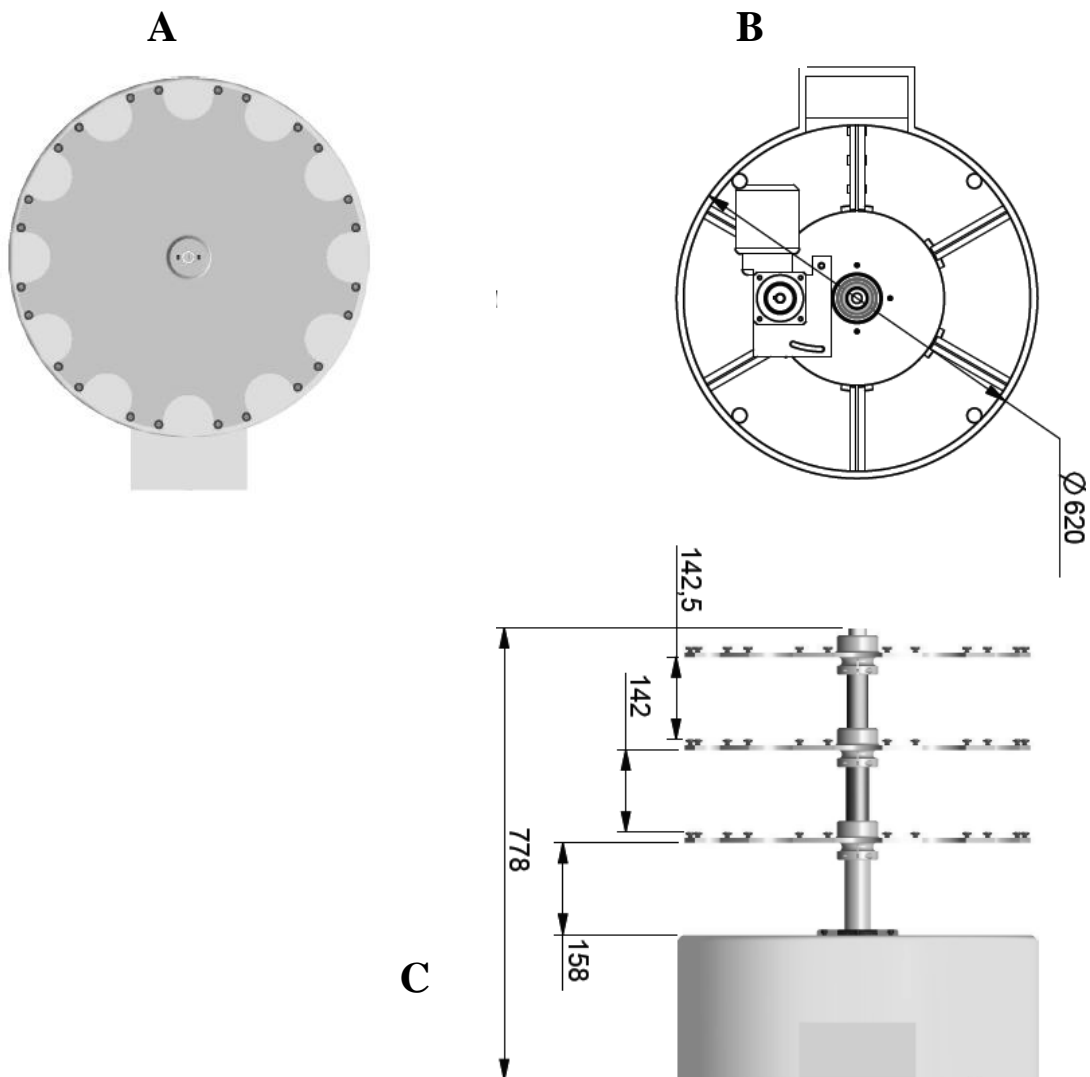


Pinos de Sustentação dos Recipientes de Amostras



SECTION B-B

Vista Frontal da Centrífuga e Corte Longitudinal (Seção B-B).

Vista Superior (A), Vista Inferior (B) e Vista Frontal (C) da Centrífuga.

APÊNDICE B – Medições amostrais dos experimentos empregando a Centrífuga V2 (P.A.= parte aérea).

Recipiente 1

Rec	Rolo	Germinadas	Crescidas	Raiz (mm)	P.A. (mm)	Total (mm)	Total germinadas
1	1	2	11	4,5	2	6,5	13
				4,5	3,5	8	
				4,5	2	6,5	
				2,5	1	3,5	
				3	3	6	
				1,5	1,5	3	
				5	2	7	
				4	2,5	6,5	
				2,5	2	4,5	
				4,5	2,5	7	
				4,5	1,7	6,2	
	2	3	10	4	2,5	6,5	13
				4,5	2,5	7	
				3,5	2	5,5	
				5	2,5	7,5	
				3,5	3	6,5	
				5,5	2,5	8	
				1	1,8	2,8	
				4,5	2	6,5	
				5,5	3	8,5	
				4	2	6	
	3	1	13	4	2	6	14
				6	2	8	
				6	2	8	
				5,5	2,5	8	
				6	3,5	9,5	
				3,5	2	5,5	
				4,5	2	6,5	
				8	3	11	
				5	1	6	
				6	2	8	
				1	1	2	
				1,5	1	2,5	
1,5	1,5	3					
Média		2,0000	11,3333	4,1324	2,1471	6,2794	13,3333

Recipiente 2

Rec	Rolo	Germinadas	Crescidas	Raiz (mm)	P.A. (mm)	Total (mm)	Total germinadas	
2	1		11	4,5	2,5	7	11	
				4	1,5	5,5		
				1,5	1	2,5		
				1,5	1,3	2,8		
				4	2	6		
				5,5	3,5	9		
				5	2	7		
				5,5	3	8,5		
				5	2,5	7,5		
				5	2,5	7,5		
				6,5	2,5	9		
	2	1		14	5	3	8	15
					4,5	2	6,5	
					1,5	1,5	3	
					3	1,5	4,5	
					4,5	1,5	6	
					3	2	5	
					5	2	7	
					5,5	3	8,5	
					5	2,5	7,5	
					4,5	2,5	7	
					5	2	7	
					4	1,5	5,5	
	5	2	7					
	5	2,5	7,5					
	3	2		13	6,5	2,5	9	15
					5	2	7	
					5,5	2,5	8	
					7	2,5	9,5	
					5	2,5	7,5	
					3,5	1,5	5	
					4	2	6	
					5	3,5	8,5	
4					2	6		
5					3	8		
4,5	1,5	6						
0,7	1,5	2,2						
3,5	2	5,5						
Média		1,5000	12,6667	4,4132	2,1789	6,5921	13,6667	

Recipiente 3

Rec	Rolo	Germinadas	Crescidas	Raiz (mm)	P.A. (mm)	Total (mm)	Total germinadas	
3	1	4	10	7	2,5	9,5	14	
				5,5	1,5	7		
				4,5	1,5	6		
				5,5	1,5	7		
				5,5	1,5	7		
				5	2,5	7,5		
				7,5	2,5	10		
				6	2	8		
				6	1,5	7,5		
				6	2	8		
	2			13	0,3	1	1,3	13
					6	2,5	8,5	
					6,5	2	8,5	
					5,5	2,5	8	
					2,5	1,5	4	
					5	2	7	
					5,5	2	7,5	
					4,5	3	7,5	
					6	2	8	
					6,5	2,5	9	
					0,7	1,3	2	
					7,5	2,5	10	
					7,5	2	9,5	
	3			14	5,5	1,5	7	14
					5	2,5	7,5	
					5,5	2	7,5	
					5,5	2	7,5	
					4	2	6	
					7	2	9	
					6	2	8	
					5,5	2	7,5	
					5	2	7	
					5	2	7	
1,5					1,3	2,8		
1,5					1,5	3		
7,5					2,3	9,8		
5	2	7						
Média		4,0000	12,3333	5,1892	1,9703	7,1595	13,6667	

Recipiente 4

Rec	Rolo	Germinadas	Crescidas	Raiz (mm)	P.A. (mm)	Total (mm)	Total germinadas	
4	1	2	11	1	2,5	3,5	13	
				7	2	9		
				6,5	2,5	9		
				4,5	2	6,5		
				4	2	6		
				4,5	1,5	6		
				7	2	9		
				6	2	8		
				8	2,5	10,5		
				5	1,5	6,5		
				8,5	2	10,5		
	2			13	7	2	9	13
					6	6	12	
					3	2	5	
					2,5	1	3,5	
					5,5	2,5	8	
					5	2,5	7,5	
					4	2	6	
					6	3	9	
					3,5	2	5,5	
					7	2	9	
					6	2	8	
					4,5	2,3	6,8	
					2,5	1,6	4,1	
	3	2		12	5,5	2	7,5	14
					5,5	2	7,5	
					6,5	2,5	9	
					7	2,5	9,5	
					8	3	11	
					4	1,5	5,5	
					6	2	8	
					7	3	10	
					1	1,5	2,5	
5					2	7		
5,5					3	8,5		
5					2,5	7,5		
Média		2,0000	12,0000	5,2917	2,2472	7,5389	13,3333	

Recipiente 5

Rec	Rolo	Germinadas	Crescidas	Raiz (mm)	P.A. (mm)	Total (mm)	Total germinadas
5	1		14	6	2,5	8,5	14
				6	2,5	8,5	
				4	2	6	
				5,5	2	7,5	
				6	2,5	8,5	
				5,5	2	7,5	
				7,5	2,5	10	
				7	2	9	
				8,5	2,5	11	
				7	1,5	8,5	
				1	1,5	2,5	
				1,5	1,5	3	
				6	2	8	
				6	3	9	
	2	1	13	8	3	11	14
				5,5	1,5	7	
				5,5	1,5	7	
				7	2	9	
				7	2	9	
				5	2,5	7,5	
				6	1,5	7,5	
				6,5	2	8,5	
				6,5	2,5	9	
				4	2	6	
				7,5	2	9,5	
				7	2	9	
	5	2	7				
	3	1	12	6	2,5	8,5	14
				5,5	2	7,5	
				3,5	1	4,5	
				5	2,5	7,5	
				5	2	7	
				6	2,5	8,5	
7				2,5	9,5		
7,5				2,5	10		
6				1,5	7,5		
7				2	9		
5				2,5	7,5		
6,5				3,5	10		
Média		1,0000	13,0000	5,8462	2,1410	7,9872	14,0000

Recipiente 6

Rec	Rolo	Germinadas	Crescidas	Raiz (mm)	P.A. (mm)	Total (mm)	Total germinadas	
6	1		14	5	2	7	14	
				5	1,5	6,5		
				5	2			
				3,5	0,8			
				7	2	9		
				4,5	2	6,5		
				5	1	6		
				5	1	6		
				3,5	1,5	5		
				6,5	2	8,5		
				8	2	10		
				7	2,5	9,5		
				7	2	9		
	5	2,5	7,5					
	2			14	5	2	7	14
					2	1	3	
					6	2,5	8,5	
					4	2	6	
					4	2	6	
					6	2,5	8,5	
					5,5	1,5	7	
					6,5	1,5	8	
					5	2	7	
					2,5	2	4,5	
					5	2	7	
					7	2	9	
					7,5	2,5	10	
	5	2	7					
	3	1		13	8	3	11	13
					6	2,5	8,5	
					5	2	7	
					6,5	2	8,5	
					5	1,5	6,5	
2					1	3		
4					2	6		
4,5					2	6,5		
5					2	7		
7					2,5	9,5		
4					2,5	6,5		
1,5					1,5	3		
5					2	7		
Média		1,0000	13,6667	5,1585	1,9220	7,1538	13,6667	

APÊNDICE C – Código do *Software* desenvolvido

```

/*
Software de Monitoramento da Centrífuga V2
Criado por: Marcelo Nava e Henrique Lasevitch
*/

import processing.serial.*;                               //Biblioteca do Serial
Serial myPort;                                           //Declara myPort como uma porta
serial

PImage img;                                             //Cria um tipo imagem
PFont f;                                               //Cria um tipo fonte
int a,b,c,d;

void setup() {

    size(700,700);                                       //Tamanho da tela

    img = loadImage("Fig1.png");                         //Carrega a imagem do layout
    f = loadFont("Calibri-30.vlw");                     //Carrega a fonte dos textos

    println(Serial.list());                             //Mostra as portas disponíveis pra escolher
    myPort = new Serial(this, Serial.list()[0], 9600);  //Seta a porta para usar
    image(img,0,0);                                     //Carrega a imagem
    textFont(f);                                       //Seta a fonte f
    fill(255);                                         //Cor

}

void draw(){

    image(img,0,0);                                     //Carrega a imagem
    textFont(f);                                       //Seta a fonte f
    fill(255);                                         //Cor

    read_values();                                     //Função que lê os valores dos sensores

    text(a,110,375);                                   //Escreve os valores lidos dos pots, nos lugares certos
    text(b,400,375);
    text(c,110,530);
    text(d,400,540);

}

void read_values(){

    int[] inByte = new int[20];

    while (myPort.available() > 0) {

```

```
for (int i = 0; i < 20; i++) {  
  
    inByte[i] = myPort.readChar();  
  
    //Varia de:      0 a 3 e  0 a 255  
    //Canal  um: inByte[11] e inByte[12]  
    //Canal  dois: inByte[13] e inByte[14]  
    //Canal  tres: inByte[15] e inByte[16]  
    //Canal  quatro: inByte[17] e inByte[18]  
  
    //Converte os valores lidos dos bytes em valores inteiros de 0 a 1023  
  
    a = inByte[12] + inByte[11]*256;  
    b = inByte[14] + inByte[13]*256;  
    c = inByte[16] + inByte[15]*256;  
    d = inByte[18] + inByte[17]*256;  
  
    delay(20);  
    }  
}
```