

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FERNANDA CRISTINA ESPER SILVA  
RAPHAEL DE OLIVEIRA FANTI

PEDAL VERDE:  
APARELHO DE EXERCÍCIOS RECUPERADOR DE ENERGIA

São Paulo  
2010

FERNANDA CRISTINA ESPER SILVA  
RAPHAEL DE OLIVEIRA FANTI

PEDAL VERDE:  
APARELHO DE EXERCÍCIOS RECUPERADOR DE ENERGIA

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para o projeto de conclusão de  
curso do Departamento de Engenharia  
Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos  
Orientador: Prof. Dr. Marcos Ribeiro  
Pereira Barretto

São Paulo  
2010

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Silva, Fernanda Cristina Esper**  
**Pedal verde: aparelho de exercícios recuperador de energia /**  
**F.C.E. Silva, R.O. Fanti. -- São Paulo, 2010.**  
**77 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de  
Sistemas Mecânicos.**

**1. Energia (Mecânica aplicada) 2. Exercício físico 3. Alterna -  
dores I. Fanti, Raphael de Oliveira II. Universidade de São Paulo.  
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e  
de Sistemas Mecânicos III. t.**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao orientador, Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barretto, pelo apoio desde quando a idéia do trabalho ainda era incipiente. Não somente o incentivo à idéia inicial, como a aplicação social do projeto, a arquitetura mecânica e idéias para o armazenamento e distribuição da energia.

Ao Prof. Dr. Julio Cesar Adamowski, pelo auxílio durante o desenvolvimento do projeto.

À banca avaliadora, Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato e Prof. Dr. Edson Gomes, que contribuiu para o aperfeiçoamento deste trabalho.

## **RESUMO**

Atualmente tem ocorrido um crescimento da demanda energética aliado à diminuição de recursos naturais, o que resulta na necessidade de desenvolvimento de fontes de energia renováveis. A força humana é uma forma de energia renovável e o seu uso tem sido substituído por outras fontes de energia. Contrapondo a esse fato, o homem realiza grandes esforços físicos diariamente em atividades físicas e, consequentemente, gera energia sem que haja utilização da mesma. Nesse contexto, a recuperação dessa energia, que é dissipada, pode ser utilizada como fonte de energia alternativa em pequenas aplicações. No ambiente de uma academia observa-se a existência um potencial energético (equipamentos de ginástica utilizados por um grande número de pessoas) que ainda é pouco explorado. Desta forma, nossa proposta é de desenvolver um equipamento para a realização de exercícios físicos que recupere a energia cinética gasta pelo usuário armazenando-a para que possa ser utilizada em aparelhos eletrônicos de baixa potência como mp3 players, celulares, laptops. O conceito pode também adquirir uma dimensão social ao servir comunidades com pouca disponibilidade de energia elétrica ou mesmo ser aplicado em escolas públicas, onde esta energia renovável poderia ser utilizada na iluminação (LEDs) e em salas de computadores. O objetivo do projeto é definir as especificações mecânicas e elétricas do aparelho, fabricar um protótipo, testá-lo e estudar a viabilidade de implementação em um centro comunitário.

Palavras-chave: Recuperação de energia humana. Ginástica. Exercícios físicos. Energia renovável. Energia alternativa. Bicicleta. Bicicleta ergométrica.

## **ABSTRACT**

Due to recent energetic demand growth, coupled with natural resources exhaustion, our society has been urging for renewable energy sources. In this sense, human power, if converted efficiently, can be seen as a viable alternative in small scale applications. The human body is exercised throughout the day-by-day activities, thus generating energy that is normally dissipated as heat. Our objective is to study the conversion of this energy and the viability of using it in small electronic devices. Therefore, the group developed a project of a machine that recovers the energy spent while at mild physical activity, for that is where the biggest energetic potential lies. We studied ways to efficiently convert this kinetic energy into electrical power to supply mp3 players, cellular phones and laptops. This concept may as well acquire a social dimension if used to serve poor communities that still don't have access to electrical supply. Many machines could be used to, for instance, to light classrooms or to supply computer rooms in schools. The objective is to define mechanical and electrical specifications, make a prototype, test it and to study the possibility of use in a community center.

Keywords: Human energy harvesting. Fitness. Exercise. Renewable energy. Alternative energy. Bicycle. Exercise bike.

## **LISTA DE FIGURAS**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - “The Human Power Generator” para braços.....                      | 15 |
| Figura 2 - “Chukka MP3 Player” .....   | 15 |
| Figura 3 - “YoYo Power Generator”.....                                       | 16 |
| Figura 4 - Aparelhos recuperadores em desenvolvimento .....                  | 16 |
| Figura 5 - Bicicleta Ergométrica tradicional .....                           | 21 |
| Figura 6 - Base de acoplamento .....   | 21 |
| Figura 7 - Bicicleta ergométrica sem rodas .....                             | 22 |
| Figura 8 - Esquema da estrutura mecânica.....                                | 23 |
| Figura 9 - Comparação entre mecanismo “base de acoplamento” e o projeto..... | 24 |
| Figura 10 - Vista lateral do mecanismo .....                                 | 24 |
| Figura 11 - Dimensões do mecanismo.....                                      | 25 |
| Figura 12 - Ponto de aplicação da carga P .....                              | 26 |
| Figura 13 - Geometria do mecanismo .....                                     | 26 |
| Figura 14 - Análise estática na roda.....                                    | 27 |
| Figura 15 - Forças nas barras laterais.....                                  | 27 |
| Figura 16 - Geometria com simetria .....                                     | 28 |
| Figura 17 - Posição do eixo em função de $\beta$ .....                       | 28 |
| Figura 18 - Dimensões calculadas .....                                       | 29 |
| Figura 19 - Esforços no eixo do recuperador elétrico .....                   | 30 |
| Figura 20 - Base de suporte ao eixo e mancais .....                          | 31 |
| Figura 21 - Especificações do rolamento .....                                | 33 |
| Figura 22 - Especificações da unidade de mancal .....                        | 34 |
| Figura 23 - Base da estrutura.....   | 34 |
| Figura 24 - Forças externas (vista de trás da bicicleta).....                | 35 |
| Figura 25 - Forças aplicadas em uma das barras laterais.....                 | 35 |
| Figura 26 - Tensões de Von Mises nas barras laterais .....                   | 36 |
| Figura 27 - Peça do mecanismo de encaixe no eixo da bicicleta .....          | 37 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28 - Tensões de Von Mises no acoplamento do eixo da roda.....     | 37 |
| Figura 29 - Estrutura ao final dos cálculos .....                        | 38 |
| Figura 30 - Motor / Gerador DC.....                                      | 39 |
| Figura 31 - Alternador .....   | 40 |
| Figura 32 - Esquema de rotação da rode e do eixo .....                   | 41 |
| Figura 33 - Circuito elétrico .....                                      | 43 |
| Figura 34 - Comparaçao das barras laterais .....                         | 44 |
| Figura 35 - Comparaçao dos mancais de acoplamento do eixo dianteiro..... | 45 |
| Figura 36 - Protótipo final alterado .....                               | 45 |
| Figura 37 - Base da estrutura.....                                       | 46 |
| Figura 38 - Barras laterais .....  | 47 |
| Figura 39 - Mancal dianteiro.....  | 47 |
| Figura 40 - Protótipo construído .....                                   | 48 |
| Figura 41 - Detalhe do acoplamento do eixo da bicicleta.....             | 48 |
| Figura 42 - Detalhe do mancal do eixo da frente.....                     | 49 |
| Figura 43 - Teste do protótipo .....                                     | 50 |
| Figura 44 - Comparaçao das energias disponíveis e recuperada .....       | 53 |
| Figura 45 - Curva de eficiêncie do alternador.....                       | 55 |

## **LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Planejamento do Projeto .....   | 12 |
| Tabela 2 - Gasto de energia por exercício (LEWANDOWSKI, 2007) .....                                    | 14 |
| Tabela 3 - Gastos energéticos para aparelhos elétricos (GHISI, 1997) .....                             | 18 |
| Tabela 4 - Aparelhos de Baixo Consumo(SONEIRA) .....   | 18 |
| Tabela 5 - Vantagens e desvantagens dos Aparelhos .....  | 22 |
| Tabela 6 - Matriz de Decisão.....  | 23 |
| Tabela 7 - Especificações do rolamento Y, YAR 2-2F .....   | 33 |
| Tabela 8 - Especificações da unidade do mancal reto do rolamento Y, caixa fundida .....                | 33 |
| Tabela 9 - Resumo: Estudo das soluções de recuperador.....   | 40 |
| Tabela 10 - Custos do projeto .....  | 49 |
| Tabela 11 - Potência e Energia calculas a partir das tensões e correntes medidas durante o teste ..... | 51 |
| Tabela 12 - Energia gasta pelo ciclista durante o teste.....   | 52 |

## **SUMÁRIO**

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | INTRODUÇÃO.....                                    | 9  |
| 1.1.   | Motivação.....                                     | 10 |
| 1.2.   | Objetivo .....                                     | 11 |
| 1.3.   | Estrutura do trabalho.....                         | 11 |
| 1.3.1. | Metodologia .....                                  | 11 |
| 1.3.2. | Planejamento.....                                  | 12 |
| 2.     | ESTUDOS INICIAIS.....                              | 14 |
| 2.1.   | Disponibilidade energética .....                   | 14 |
| 2.2.   | Aparelhos recuperadores .....                      | 15 |
| 2.2.1. | Aparelhos comerciais .....                         | 15 |
| 2.2.2. | Outros.....  | 16 |
| 2.3.   | Aspecto social .....                               | 17 |
| 2.3.1. | Necessidade energética do centro comunitário ..... | 17 |
| 3.     | ANÁLISE DE ALTERNATIVAS.....                       | 19 |
| 3.1.   | Tipo de exercício .....                            | 19 |
| 3.2.   | Critério de seleção .....                          | 19 |
| 3.2.1. | Atributos requeridos.....                          | 19 |
| 3.2.2. | Atributos desejados .....                          | 19 |
| 3.3.   | Escolha da solução mecânica.....                   | 20 |
| 3.3.1. | Levantamento de soluções.....                      | 20 |
| 3.3.2. | Especificação da solução .....                     | 23 |
| 4.     | PROJETO.....                                       | 25 |
| 4.1.   | Projeto mecânico .....                             | 25 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.1.1. | Principais parâmetros .....                  | 25 |
| 4.1.2. | Eixo do recuperador elétrico .....           | 30 |
| 4.1.3. | Mancais de rolamento para o eixo .....       | 31 |
| 4.1.4. | Base da estrutura .....                      | 34 |
| 4.1.5. | Barras laterais.....                         | 34 |
| 4.1.6. | Acoplamento da roda.....                     | 36 |
| 4.1.7. | Montagem.....                                | 38 |
| 4.2.   | Projeto elétrico .....                       | 39 |
| 4.2.1. | Escolha do gerador.....                      | 39 |
| 4.2.2. | Especificação.....                           | 41 |
| 4.2.3. | Sistema de armazenagem de energia .....      | 42 |
| 4.2.4. | Circuito elétrico .....                      | 43 |
| 5.     | RESULTADOS .....                             | 44 |
| 5.1.   | Construção do protótipo .....                | 44 |
| 5.1.1. | Modificações iniciais .....                  | 44 |
| 5.1.2. | Aquisição de material .....                  | 45 |
| 5.1.3. | Usinagem e Soldagem .....                    | 46 |
| 5.1.4. | Montagem.....                                | 48 |
| 5.1.5. | Custos .....                                 | 49 |
| 5.2.   | Resultados .....                             | 50 |
| 5.2.1. | Testes.....                                  | 50 |
| 5.2.2. | Implantação em um centro comunitário .....   | 53 |
| 5.2.3. | Sugestões para trabalhos futuros .....       | 54 |
|        | REFERÊNCIAS.....                             | 57 |
|        | ANEXOS .....                                 | 59 |
|        | ANEXO A - Cronograma (Diagrama Gantt).....   | 60 |
|        | ANEXO B - Rotinas de cálculo em Matlab ..... | 61 |

ANEXO C - Desenhos Mecânico.....63

## 1. INTRODUÇÃO

Com o decorrer dos anos vem aumentando preocupação com a beleza e, principalmente, a saúde. Um dos meios que se encontrou para alcançar esses objetivos são as academias de ginástica. Simultaneamente existe uma outra tendência, a sustentabilidade ambiental e sua vertente de desenvolvimento e uso de fontes alternativas de energia. Isso aliado às diversas necessidades da sociedade, com relação a esses problemas, estabelece um novo segmento para o desenvolvimento e soluções dos mesmos.

Nas academias, grande parte da energia que é produzida pelos aparelhos é dissipada. Nesse contexto, o reaproveitamento da energia perdida diariamente é de grande utilidade. Isso pode ser feito em qualquer academia e tem seu valor potencializado se utilizado em comunidades de baixa renda. Objetivando essa integração de propósitos, o projeto busca o desenvolvimento de um dispositivo de ginástica que possa ser implantado em centros comunitários, para gerar energia para o local e resultar assim numa redução nos gastos com energia além do benefício proporcionado pelos exercícios.

Após a análise dos possíveis tipos de aparelhos de ginástica e das aplicações desejadas, foi determinado que o equipamento final teria a função de uma bicicleta ergométrica. Para tornar isso possível, a estrutura é composta por uma bicicleta comum suspensa pelo dispositivo projetado. Após esta definição, iniciaram-se os projetos mecânico e elétrico. Todas estas etapas, que estão detalhadas neste relatório, seguem o planejamento, que tem como finalidade projetar o equipamento, fabricar seu protótipo e testá-lo.



## 1.1. Motivação

O foco do grupo foi o desenvolvimento de um produto para o qual houvesse um mercado inexplorado, seja no Brasil ou no exterior.

De imediato, considerou-se a abordagem de um assunto sustentável, visto a evidência deste assunto nos meios de comunicação. O grupo identificou uma oportunidade de mercado para um produto que aliasse uma atividade física a um benefício ambiental. Em ambos assuntos percebe-se o crescimento vertiginoso de demanda nos últimos anos.

Segundo o levantamento realizado pela *International Health Racquet and Sportsclub Association*(IHRSA, associação internacional da indústria de saúde e ginástica), no âmbito das atividades físicas, o Brasil é o segundo país do mundo no mercado de ginástica e bem-estar. O que também se destaca, é o aumento de ciclovias e corridas organizadas. Este fenômeno não é menos importante nos Estados Unidos e na Europa. O “bem-estar” é atualmente um mercado em plena expansão no mundo. Acredita-se que existe um mercado ainda inexplorado, especialmente para produtos de uso em casas ou em academias, devido a preocupação com a violência no Brasil e do clima em outros países, o que levam as pessoas a buscarem produtos cuja utilização é feita em ambientes fechados.

No âmbito ambiental, as projeções também são otimistas. Vive-se em um período de muita exposição da mídia sobre assuntos ligados a sustentabilidade ambiental. Desta forma, criou-se uma orientação, por parte dos consumidores, de procurar produtos de mínimo impacto ambiental. Esta tendência também é global, sendo que produtos ligados a esta vertente são de alta demanda tanto no Brasil quanto no exterior.

Durante o exercício gasta-se energia, que se dissipa em forma de calor. Desse fato surge a possibilidade de recuperar parte desta energia para benefício do próprio usuário. Assim, criou-se o conceito do aparelho recuperador de energia.

Por último, existe a motivação de aplicar o conceito em um centro comunitário.

## 1.2. Objetivo

O objetivo do projeto é projetar e fabricar um protótipo que acople uma bicicleta de forma a mantê-la na posição vertical e, assim, rotacionar um eixo possibilitando a transformação de energia cinética em energia química em uma bateria. Certamente o conceito já existe, porém com poucas soluções comerciais e com foco social. Para tanto, visa-se o estudo da viabilidade da utilização da máquina em centros comunitários.

## 1.3. Estrutura do trabalho

### 1.3.1. Metodologia

Adotou-se uma estrutura de projeto de engenharia com planejamento, reconhecimento da necessidade e requisitos, definição do problema, geração e análise de alternativas de solução, definição de critérios para comparação de alternativas, escolha da melhor alternativa, detalhamento da solução, construção, testes, operação e manutenção.

Logo no início do projeto, foi realizado o cronograma, que direcionou as atividades. O esquema adotado comprehende uma fase de estudo de viabilidade, uma fase de projeto básico e outra de projeto executivo. No estudo de viabilidade definiu-se as especificações técnicas, estudo da disponibilidade energética dos exercícios físicos, levantamento de produtos com finalidades similares e geração de soluções alternativas. O projeto básico consiste na escolha da melhor solução e desenvolvimento de modelos matemáticos e virtuais. O detalhamento, a fabricação e as conclusões formam o projeto executivo. Cada etapa do desenvolvimento é marcada pela revisão dos produtos e do desempenho do projeto até o momento visando a qualidade e prazo determinados.

### 1.3.2. Planejamento

Segundo a metodologia adotada, realizou-se um cronograma, vide tabela 1.

Tabela 1 - Planejamento do Projeto

| Ação  | Início  | Término | Dias |
|---|---------|---------|------|
| <b>Ficha de inscrição</b>                         | 10-Mar  | 20-Mar  | 8    |
| <b>Pesquisa</b>                                   | 10-Mar  | 8-Abr   | 21   |
| <b>Motivações e contexto</b>                      | 10-Mar  | 26-Mar  | 12   |
| <b>Mercados</b>                                   | 10-Mar  | 26-Mar  | 12   |
| <b>Recuperação de energia humana</b>              | 22-Mar  | 26-Mar  | 4    |
| <b>Soluções existentes</b>                        | 22-Mar  | 26-Mar  | 4    |
| <b>Levantamento de soluções</b>                   | 22-Mar  | 8-Abr   | 13   |
| <b>Parte mecânica</b>                             | 22-Mar  | 8-Abr   | 13   |
| <b>Parte elétrica</b>                             | 2-Abr   | 8-Abr   | 4    |
| <b>Escolha da solução</b>                         | 8-Abr   | 23-Abr  | 11   |
| <b>Especificação dos objetivos</b>                | 8-Abr   | 14-Abr  | 4    |
| <b>Modelagem simples</b>                          | 14-Abr  | 20-Abr  | 4    |
| <b>Escolha</b>                                    | 16-Abr  | 23-Abr  | 5    |
| <b>Preparação do relatório parcial</b>            | 12-Abr  | 14-Abr  | 2    |
| <b>Projeto</b>                                    | 15-Abr  | 10-Jun  | 40   |
| <b>Definição dos parâmetros de Projeto</b>        | 15-Abr  | 16-Abr  | 1    |
| <b>Levantamento dos componentes</b>               | 16-Abr  | 23-Abr  | 5    |
| <b>Mecânicos</b>                                  | 16-Abr  | 22-Abr  | 4    |
| <b>Elétricos</b>                                  | 16-Abr  | 22-Abr  | 4    |
| <b>Escolha (1a.)</b>                              | 22-Abr  | 23-Abr  | 1    |
| <b>Modelagem Matemática</b>                       | 23-Abr  | 13-Maio | 14   |
| <b>Mecânicos</b>                                  | 23-Abr  | 4-Maio  | 7    |
| <b>Elétricos</b>                                  | 23-Abr  | 4-Maio  | 7    |
| <b>Junção dos modelos</b>                         | 30-Abr  | 4-Maio  | 2    |
| <b>Elaboração de cenários de testes</b>           | 3-Maio  | 6-Maio  | 3    |
| <b>Testes</b>                                     | 6-Maio  | 13-Maio | 5    |
| <b>Especificações do protótipo</b>                | 13-Maio | 10-Jun  | 20   |
| <b>Peças a usinar (projeto em CAD)</b>            | 13-Maio | 4-Jun   | 16   |
| <b>Esquemas elétricos</b>                         | 19-Maio | 1-Jun   | 9    |
| <b>Lista de componentes mecânicos e elétricos</b> | 4-Jun   | 5-Jun   | 1    |
| <b>Listar fornecedores</b>                        | 7-Jun   | 10-Jun  | 3    |
| <b>Preparação do relatório Final</b>              | 31-Maio | 19-Jun  | 15   |
| <b>Preparação da Apresentação</b>                 | 22-Jun  | 30-Jun  | 6    |

Ao final do projeto, constatou-se que o planejamento foi seguido em quase todas as etapas. Salvo por alguns atrasos na parte de estudos, principalmente pela adição do centro comunitário como meta, as etapas foram realizadas no período determinado. Para uma visualização em modo Gantt do projeto, vide anexo A.

## 2. ESTUDOS INICIAIS

### 2.1. Disponibilidade energética

Com o objetivo de verificar a viabilidade do projeto, foi feito um estudo da energia passível de reutilização em um exercício físico. A tabela abaixo mostra o gasto de energia durante alguns exercícios. Para efeito de comparação, na última coluna da tabela 2, há o equivalente, em tempo, de uso de um computador portátil, em caso de rendimento de 100%.

Tabela 2 - Gasto de energia por exercício (LEWANDOWSKI, 2007)

| Atividade             | Energia Dissipada  | Tempo de Laptop (35W) |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| <b>Andando</b>        | 0,49J / Kg*Passo   | 1 s / Passo           |
| <b>Subindo escada</b> | 1,96 J / Kg*Degrau | 4,3 s / Degrau        |
| <b>Bicicleta</b>      | 88,2 J / Rotação   | 2,5 s / Rotação       |
| <b>Musculação</b>     | 9,8 J / Kg*m       | 1,4 s / Repetição     |
| <b>Maratona (4hs)</b> | 962 KJ / 4 horas   | 7,6 horas/ Maratona   |

Conclui-se que existe energia suficiente na prática de atividades físicas para o uso em aparelhos eletro-eletrônicos de baixa potência.

## 2.2. Aparelhos recuperadores

### 2.2.1. Aparelhos comerciais

Nesta seção, são listados alguns aparelhos disponíveis no mercado que desempenham a função que se almeja, permitir ao usuário recuperar a energia de exercícios físicos.

“The Human Power Generator” é um dispositivo com pedais que possui modelos para braços (Figura 1) e pernas. Carrega uma bateria de 12V, permite até 60W convertidos e custa US\$ 550.



Figura 1 – “The Human Power Generator” para braços

“Chukka MP3 Player” é um tocador de mp3 que usa o movimento do usuário como fonte de energia(Figura 2). Usa energia cinética do movimento de anéis, uma transformação eletromagnética sem motor.



Figura 2 – “Chukka MP3 Player”

O “YoYo Power Generator” funciona como um ioiô (Figura 3). Projetado para alimentar o notebook de US\$100 de Negroponte (MIT), usa somente a energia da ida, uma mola coordena a volta. 1 minuto de exercício equivale a 25 minutos de uso de um celular.

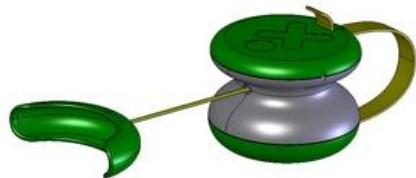


Figura 3 – “YoYo Power Generator”

#### 2.2.2. Outros

Além destes aparelhos comerciais, diversos órgãos de pesquisa buscam maneiras de recuperar a energia gasta ao longo do dia. Dentre estes, a NASA tem grande interesse na tecnologia, pois, dado o custo da energia no espaço e a falta de fontes, o trabalho humano é visto como uma fonte interessante. Dentre as possibilidades estudadas pela agência, constam o uso do calor humano (KYMESIS, 2008, figura 4 à direita), a energia cinética de andar (BIOPHAN TECHNOLOGIES, 2005, figura 4 à esquerda), a respiração e outros. O fato destas fontes serem estudadas tão amplamente nos mostra que esta é uma vertente sólida, que provavelmente vai crescer nos próximos anos.



Figura 4 - Aparelhos recuperadores em desenvolvimento

## 2.3. Aspecto social

A aplicação do projeto em um centro comunitário amplia a sua abrangência e possibilita a difusão dessa tecnologia a pessoas de menor poder aquisitivo, que serão beneficiadas tanto em relação a saúde e financeiramente quanto à conscientização ambiental.

Com o intuito de caracterizar a estrutura de um centro comunitário, visitou-se o Centro Comunitário do Conjunto Residencial Butantã “José Octaviano Ximenes”. Com base na estrutura do local, estudou-se a necessidade energética dos centros comunitários e buscou-se soluções para a viabilização do projeto com o aparelho.

### 2.3.1. Necessidade energética do centro comunitário

O Centro Comunitário do Conjunto Residencial Butantã “José Octaviano Ximenes” possui um grande salão multiuso (20x40m), três salas pequenas (10x20m), dois banheiros e uma cozinha. Semanalmente, os ambientes são utilizados para a realização de 10 horas de aulas de dança, 8 horas de reuniões, 4 horas de aula de pintura e 2 horas de aulas de ioga. Essa estrutura é equipada com: lâmpadas fluorescentes, 1 ventilador de teto, 1 tocador de CD, 1 televisão, 1 computador, 2 chuveiros (uso esporádico), 1 forno microondas, 1 congelador e 1 geladeira.

Com base nesse levantamento dos equipamentos eletrônicos e das atividades do centro comunitário, estimou-se o consumo energético, vide tabela 3.

Tabela 3 - Gastos energéticos para aparelhos elétricos (ELETROBRAS)

| Aparelho                          | Potência (W) | Uso mensal (h) | Energia gasta (kWh) |
|-----------------------------------|--------------|----------------|---------------------|
| <b>Aparelho de som</b>            | 80           | 40             | 3,2                 |
| <b>Bomba d'água</b>               | 335          | 13             | 4,4                 |
| <b>Chuveiro elétrico</b>          | 3500         | 7              | 24,5                |
| <b>Computador/ impressora</b>     | 180          | 78             | 14                  |
| <b>Geladeira 01 porta</b>         | 90           | 720            | 64,8                |
| <b>Ventilador de teto</b>         | 120          | 1000           | 120                 |
| <b>Forno microondas</b>           | 1200         | 7              | 8,4                 |
| <b>Congelador</b>                 | 130          | 720            | 93,6                |
| <b>Iluminação 1 sala (flúor.)</b> | 100          | 600            | 60                  |
| <b>TV 20" (CRT)</b>               | 90           | 16             | 1,4                 |

Estimou-se que o aparelho produzirá 50 W de saída, dado os gastos médios nos exercícios (vide tabela 2) e os rendimentos dos geradores e dos armazenadores. Assim, em 3 horas de utilização diária, 20 dias por mês, cada aparelho produziria 3 kWh de energia.

A maioria das aplicações fica fora do alcance do produto. Mesmo usando-se 5 aparelhos recuperadores, somente se conseguiria suprir 3 dos aparelhos acima. A solução encontrada foi substituir alguns aparelhos eletrônicos por equivalentes de menor demanda energética, conforme a tabela abaixo:

Tabela 4 - Aparelhos de Baixo Consumo (SONEIRA)

| Aparelho              | Potência (W) | Uso mensal (h) | Energia gasta (kWh) |
|-----------------------|--------------|----------------|---------------------|
| <b>TV 20" plasma</b>  | 30           | 16             | 0,5                 |
| <b>Laptop</b>         | 30           | 78             | 2,4                 |
| <b>Iluminação LED</b> | 10           | 600            | 6                   |

Com estes aparelhos energeticamente eficientes, seria possível suprir algumas das importantes necessidades energéticas com o aparelho projetado. Levando-se em conta este estudo de viabilidade, concluiu-se que o projeto é factível.

### 3. ANÁLISE DE ALTERNATIVAS

#### 3.1. Tipo de exercício

Visto a aplicação em centros comunitários, podemos concluir que prioriza-se a quantidade de energia produzida e a inovação do produto em si. Neste caso, a atividade de pedalar destaca-se, pois muita potência é produzida (média de 60W, com picos de 100W) e o movimento de rotação pode ser facilmente convertido. Portanto, definiu-se que o aparelho a ser projetado é do tipo bicicleta ergométrica.

#### 3.2. Critério de seleção

Durante a fase de estudos, definiram-se os objetivos do aparelho para direcionar a escolha da solução. Definiu-se atributos tendo em vista a aplicação do equipamento em centros comunitários.

##### 3.2.1. Atributos requeridos

- a. Aparelho de exercício físico que recupere a energia gasta pelo utilizador;
- b. O exercício deve ser do tipo bicicleta ergométrica;
- c. A energia deve ser armazenada na forma de eletricidade, para uso posterior.

##### 3.2.2. Atributos desejados

- a. Aparelho de utilização simples;
- b. O custo deve ser minimizado;
- c. O equipamento requerer o mínimo possível de manutenção;
- d. Deve-se buscar o máximo de portabilidade (minimizar a ocupação de espaço);
- e. O aparelho deve ter rendimento maximizado;

- f. O projeto deve ser simples, condizente com o contexto de um trabalho de conclusão de curso.

### **3.3. Escolha da solução mecânica**

Nesta fase, escolheu-se uma solução mecânica que satisfaça os critérios definidos anteriormente. Em primeiro lugar, o objetivo é analisar de maneira transversal as diversas possibilidades, sejam estas novas ou adaptações de soluções já existentes. A seguir, escolhe-se uma, sob o prisma das vantagens e desvantagens apresentadas. Por último, definem-se as especificações de projeto, a serem utilizadas na seguinte fase.

#### *3.3.1. Levantamento de soluções*

A partir das especificações, realizou-se uma extensa busca de soluções de bicicletas ergométricas. A primeira, que chamou-se de “clássica”, é bicicleta ergométrica tradicional, figura 5. Amplamente utilizados em academias e em casa, estes aparelhos possuem como características:

- a. Conjunto completo, fechado, muitas vezes com design atraente;
- b. Muitas vezes, possuem mostradores de tempo, distância, calorias queimadas, freqüência cardíaca;
- c. Regulador de intensidade.
- d. Nestes aparelhos, a energia do usuário é usualmente dissipada em forma de calor, de 3 maneiras:
- e. Atrito entre a roda e uma tira de tecido ou borracha;
- f. Forças viscosas da movimentação de uma hélice em um óleo;
- g. Forças magnéticas geradas por um imã solidário à roda, girando em torno se espiras, que alimentam uma resistência o que possibilita a conversão eletromagnética da energia disponível.



Figura 5 - Bicicleta Ergométrica tradicional

A segunda alternativa encontrada, aqui denominada “base de acoplamento”, é um equipamento largamente utilizado por ciclistas de competição, especialmente nos países frios durante os meses de inverno, quando as condições meteorológicas não permitem a prática ao ar livre. Ela consiste em uma base, onde se acopla a roda traseira da bicicleta, figura 6. Nestes aparelhos, a roda entra em contato com um eixo que consequentemente gira solidário a esta. O eixo é ligado a uma espécie de freio, que oferece resistência ao movimento. Estes freios são de natureza semelhante ao previamente explicados.

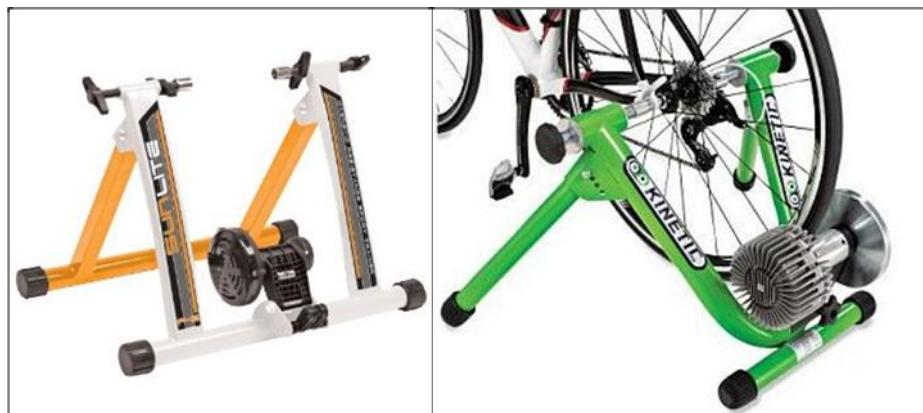


Figura 6 - Base de acoplamento

A última solução analisada, denominada “sem rodas”, é um eixo com pedais (figura 7), consiste em uma base com mancal, onde é acoplado um eixo ligado a pedais. A resistência é oferecida somente por atrito nos mancais. Esta solução simples, segundo nossas pesquisas, traz problemas de ergonomia por não oferecer o suporte de uma bicicleta. Porém, sua mecânica é a mais simples das encontradas. Além disso, o fato de não haver rodas causa uma diminuição no momento de inércia, o que não propicia ao usuário a sensação de pedalar uma bicicleta.



Figura 7 - Bicicleta ergométrica sem rodas

Para analisar a mais interessante das três soluções, fez-se uma tabela de vantagens e desvantagens (vide tabela 5), assim como uma matriz de decisão de engenharia.

Tabela 5 - Vantagens e desvantagens dos Aparelhos

| Aparelho                   | Vantagens                      | Desvantagens                              |
|----------------------------|--------------------------------|---|
| <b>Clássica</b>            | Design                         | Projeto complexo                          |
|                            | Poucas perdas mecânicas        | Equipamento caro                          |
|                            |                                | Grande e pesado                           |
| <b>Base de Acoplamento</b> | Portátil                       | Pouco confortável                         |
|                            | Barato                         | Funciona somente com a bicicleta acoplada |
|                            | Alta energia disponível        |   |
| <b>Sem rodas</b>           | Simples de projetar e fabricar | Menos energia disponível                  |
|                            |                                | Dificuldade de acoplamento com o gerador  |
|                            |                                | Baixa Ergonomia                           |

A matriz de decisão (tabela 6) levará em conta somente os atributos desejados e seus respectivos pesos, dado que todos os atributos necessários já são satisfeitos pelas soluções encontradas.

Nesta, são atribuídas notas inteiras de 1 a 3 para cada requisito, sendo 1 pouco satisfatório e 3 muito satisfatório. Desta forma, a solução com mais pontos é a mais interessante.

Tabela 6 - Matriz de Decisão

| Aparelho                   | Simplicidade de uso | Facilidade de Manutenção | Portabilidade | Alto rendimento | Simplicidade de projeto | Total |
|----------------------------|---------------------|--------------------------|---------------|-----------------|-------------------------|-------|
| <b>Clássica</b>            | 3 x 3               | 2 x 2                    | 1 x 2         | 3 x 1           | 1 x 1                   | 19    |
| <b>Base de acoplamento</b> | 2 x 3               | 3 x 2                    | 3 x 2         | 2 x 1           | 2 x 1                   | 22    |
| <b>Sem rodas</b>           | 1 x 3               | 3 x 2                    | 3 x 2         | 1 x 1           | 3 x 1                   | 19    |

Assim sendo, escolheu-se a “base de acoplamento” como solução mais adequada ao projeto.

### 3.3.2. Especificação da solução

Com base na solução escolhida foi desenvolvida uma estrutura (vide esquema da figura 8) com o objetivo de recuperar energia minimizando as perdas e possibilitar o acoplamento de diversos tipos e tamanhos de rodas.

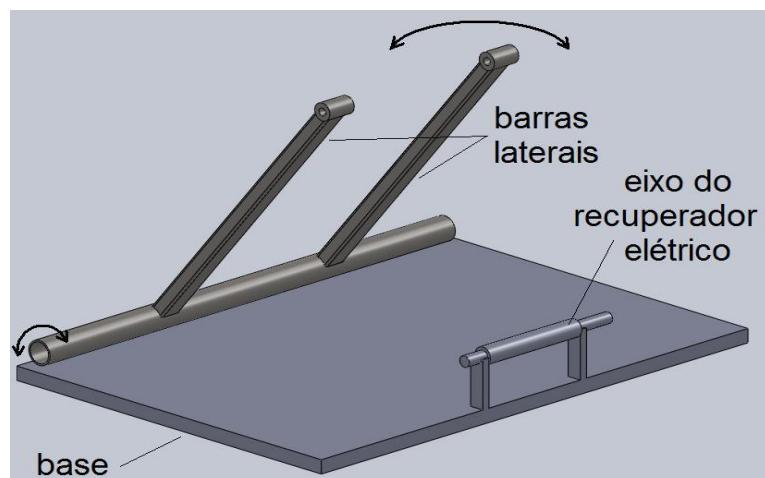


Figura 8 - Esquema da estrutura mecânica

No projeto, o freio do equipamento do tipo “base de acoplamento” foi substituído pelo recuperador elétrico (vide comparação dos mecanismos na figura 9). Como o eixo é colinear ao gerador, reduz-se as perdas de transmissão.



Figura 9 - Comparação entre mecanismo “base de acoplamento” e o projeto

Na estrutura da “base de acoplamento” as barras laterais suportam a roda traseira lateralmente e verticalmente. Com o objetivo de reduzir as tensões nas barras laterais, a roda é suportada verticalmente, em parte, pelo eixo do recuperador elétrico (vide vista lateral na figura 10). Com essa configuração, as barras laterais podem ser reduzidas a um formato de “U” que gira em relação à base para que diversos tamanhos de rodas possam ser acoplados.

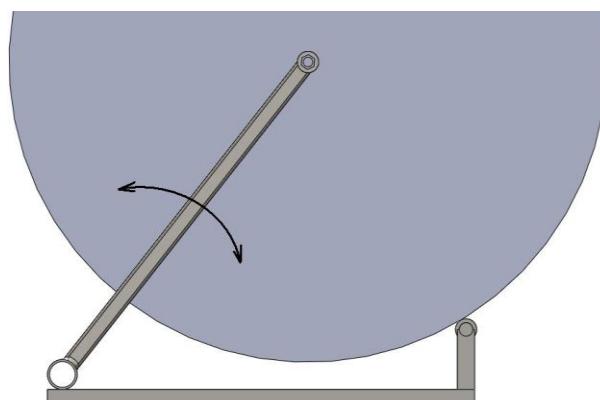


Figura 10 - Vista lateral do mecanismo

## 4. PROJETO

### 4.1. Projeto mecânico

#### 4.1.1. Principais parâmetros

Inicialmente é necessário definir os parâmetros principais do projeto, que foram determinadas de acordo com a figura 11.

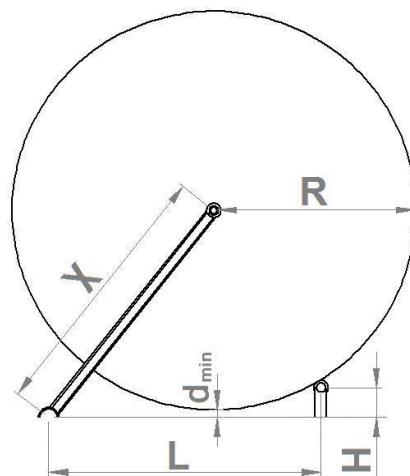


Figura 11 - Dimensões do mecanismo

H: altura do eixo do recuperador elétrico em relação ao chão

L: comprimento da base

X: comprimento das barras laterais

Os principais dados iniciais do projeto são:

- R: raio da roda
- P: peso do ciclista
- e: largura da roda
- $d_{min}$ : distância mínima da roda ao chão (dimensão de segurança)

As rodas mais comuns no mercado são de 700mm e 22" (560mm) de diâmetro. Adota-se uma variabilidade de 10% nos diâmetros, ou seja

$$R_{\min} = \left(1 - \frac{10}{100}\right) * \left(\frac{560}{2}\right) = 250\text{mm} \quad \text{e} \quad R_{\max} = \left(1 + \frac{10}{100}\right) * \left(\frac{700}{2}\right) = 385\text{mm}$$

Admite-se uma pessoa de 90kg. Com 50% de fator de segurança obtém-se uma carga de 135kg. A carga P estimada em 135kgf(~1350N) é aplicada conforme a figura 12.

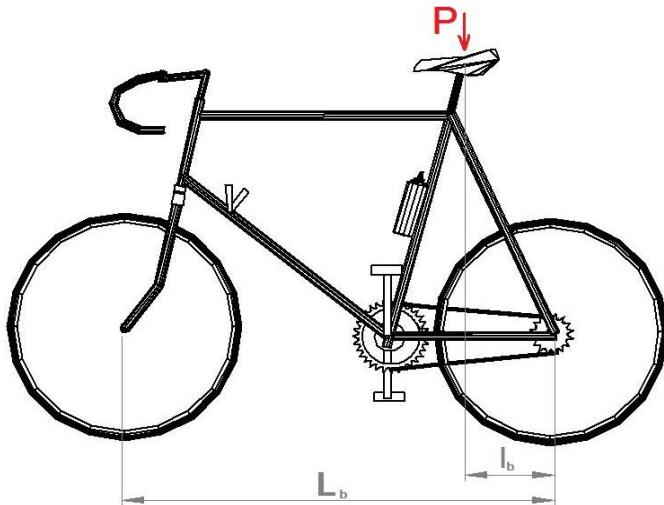
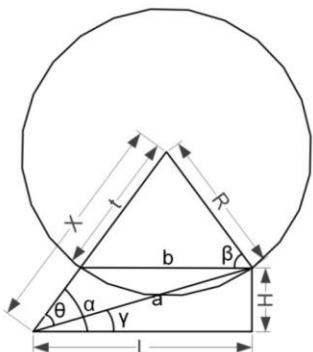


Figura 12 - Ponto de aplicação da carga P

Admite-se que  $L_b \gg l_b$  para que a análise seja feita para o pior caso, no qual toda a carga está sobre a roda traseira. Como a estrutura é simétrica em relação ao plano da roda o estudo foi realizado para um lado do plano de simetria. Portanto, considera-se que uma força  $P/2=675\text{N}$  é aplicada no centro da roda.

Para o cálculo da força de atrito admite-se os limites da largura da roda  $e_{\min} = 20\text{mm}$  e  $e_{\max} = 50\text{mm}$ .

O objetivo é resolver o problema geométrico da figura 13.



$$a = \sqrt{(H^2 + L^2)} \quad (1)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{H}{L}\right) \quad (2)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{X^2 + a^2 - R^2}{2 * X * a}\right) \quad (3)$$

$$\alpha = \gamma + \theta \quad (4)$$

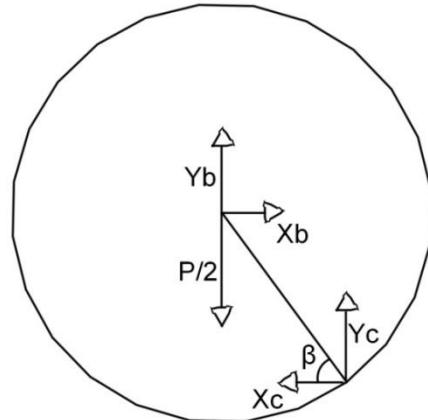
$$b = L - \frac{H}{\tan(\alpha)} \quad (5)$$

$$t = X - \frac{H}{\sin(\alpha)} \quad (6)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{R^2 + b^2 - t^2}{2 * R * b}\right) \quad (7)$$

Figura 13 - Geometria do mecanismo

Analisa-se, então, a estática da estrutura:



$$Y_b + Y_c = \frac{P}{2} \quad (8)$$

$$X_b = X_c \quad (9)$$

Figura 14 - Análise estática na roda

Complementando o equacionamento há duas condições de contato:

- a. As barras laterais estão somente sujeitas a compressão (vide figura 15),

portanto  $\frac{Y_b}{X_b} = \tan(\alpha)$  (10).

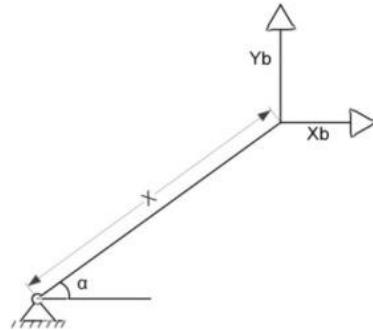


Figura 15 - Forças nas barras laterais

- b. O contato do cilindro (eixo do recuperador elétrico) é um apoio simples,

portanto  $\frac{Y_c}{X_c} = \tan(\beta)$  (11).

Para que qualquer tamanho de roda encaixe na estrutura foi adotado, inicialmente,  $R = R_{máx}$ . Adotou-se  $\alpha$  equivalente a  $\beta$ , pois, assim, as forças são simétricas. Com essa simplificação na geometria as relações, conforme a figura 16, se resumem a:

$$L = \cos(\beta) * 2 * R_{máx} + \frac{H}{\tan(\beta)} \quad (12)$$

$$X = R + \frac{H}{\sin(\beta)} \quad (13)$$

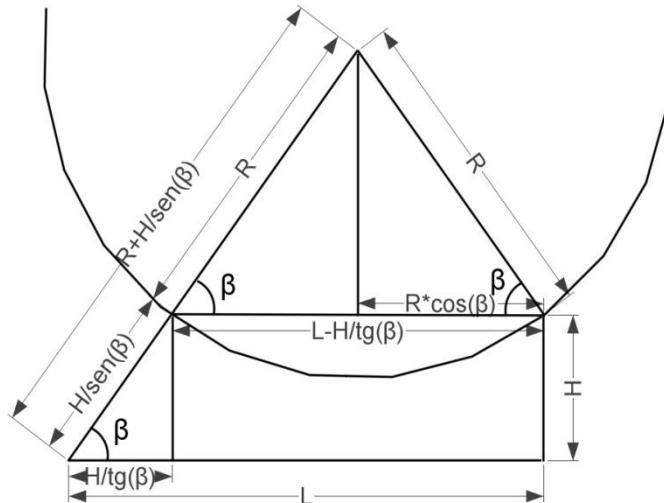
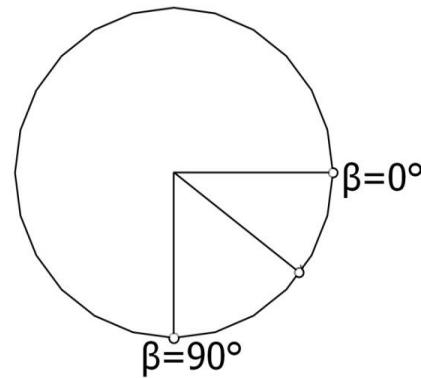


Figura 16 - Geometria com simetria

O valor de  $\beta$  deve estar entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  (vide figura 17) para qualquer tamanho de roda, pois deseja-se que o centro da roda esteja entre os apoios para minimizar as reações nos mesmos. Para  $\beta=0^\circ$ , há uma inconsistência, pois, segundo o projeto, a roda deve ser apoiada sobre o eixo. O aumento de  $\beta$  diminui, desejavelmente, o valor de  $X_c$ . Porém, como nas situações de  $\beta$  próximo a  $90^\circ$  o mecanismo fica muito instável, devido a pequenas variações do ângulo que modificam a direção e valor das forças, limitou-se esse ângulo a aproximadamente  $80^\circ$ .

Figura 17 - Posição do eixo em função de  $\beta$ 

Utilizou-se as equações de (1) a (7), (12) e (13), com o auxílio do MatLab, determinou-se qual o valor máximo de  $\beta$ , para  $R = R_{\max}$ , no qual o limite inferior do raio da roda não ultrapassasse  $80^\circ$  dados os parâmetros "L", "H" e "X" obtidos (vide anexo 2 - rotinas de cálculo em MatLab). Como "H" é uma variável que está

associada ao  $d_{min}$ , ao eixo e seu suporte, o valor adotado para essa variável foi 70mm. A partir da variação de  $\beta$  foram encontrados os seguintes parâmetros:

- $\beta = 1,1\text{rad} \approx 63^\circ$
- $L = 384,8\text{mm} \approx 385\text{mm}$
- $X = 463,5\text{mm} \approx 464\text{mm}$
- $\beta(R_{\min}) = 1,39\text{rad} \approx 79,5^\circ$
- $\alpha(R_{\min}) = 0,75\text{rad} \approx 43^\circ$

Ao substituir os valores acima nas equações de (8) a (11), obteve-se:

$$\text{a. para } R = R_{\max}, X_b = X_c = 171,8N, Y_b = Y_c = 337,5N$$

$$\text{b. para } R = R_{\min}, X_b = X_c = 106,7N, Y_b = 99,3N, Y_c = 575,7N$$

Porém, também deve-se considerar a situação dinâmica na qual aparece uma força interna.

Na situação estacionária,  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . Portanto,  $\tau$  é constante. Assim,  $F_{at} = \frac{\tau_{ciclista}}{R}$ .

Adotando  $P_{\max} = 100\text{w}$  e  $f_{\max} = 3\text{Hz}$  ( $\omega \approx 18\text{rad/s}$ ) como as máximas potência e freqüência que um ciclista pode desenvolver, temos  $\tau = \frac{P_{\max}}{\omega} = 5,1N$ .

Para um raio de roda de 250mm,  $F_{at} = 20,4N$ . Dado que  $P=1350\text{N}$ ,  $F_{at} \ll P$ . Assim, a  $F_{at}$  pode ser desconsiderada nos cálculos. Portanto, as dimensões da estrutura são:

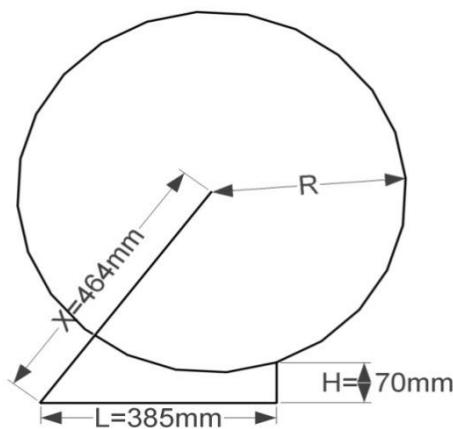


Figura 18 - Dimensões calculadas

#### 4.1.2. Eixo do recuperador elétrico

Como a soma vetorial das forças  $X_c = 106.7\text{N}$  e  $Y_c = 575,7\text{N}$  no caso de  $R = R_{min}$  são maiores, elas serão utilizadas para o cálculo do eixo do recuperador elétrico.

A força de  $F_c = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} = 585,5\text{N} \approx 600\text{N}$  é aplicada em cada metade do eixo devido à simetria. Para estudar a maior concentração de carga possível foi adotado  $e_{min} = 20\text{mm}$ . Devido a questões de estabilidade o eixo terá um comprimento  $l=150\text{mm}$ . A figura 19 representa os esforços na estrutura.

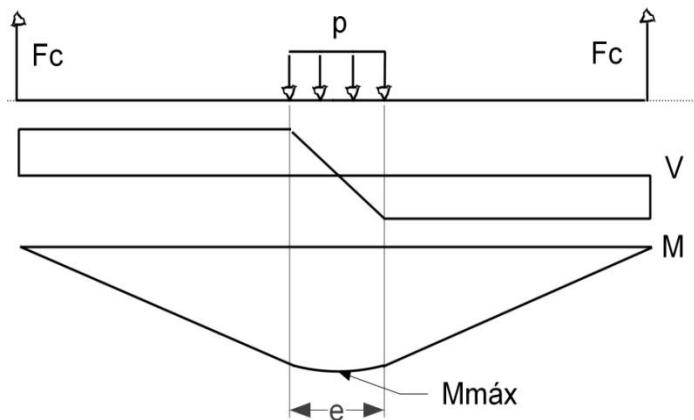


Figura 19 - Esforços no eixo do recuperador elétrico

Portanto,  $p = \frac{2 * F_c}{e} = \frac{2 * 600}{20} = 60\text{N/mm}$ , força cortante máxima  $Q_{máx} = 600\text{N}$  e momento fletor máximo  $M_{máx} = 600 * (75 - 10) = 40\text{kN*mm}$ .

Admite-se uma tensão de compressão máxima menos que 10%( $\eta$ ) da tensão de escoamento. A partir da relação  $\sigma_{máx} = \frac{M}{I} * \left(\frac{d}{2}\right) \leq \eta * \sigma_{esc}$ , dado que a tensão de escoamento do aço é  $\sigma_{esc,aço} = 270\text{MPa}$ , pode-se determinar o diâmetro mínimo  $d \geq 24,19\text{mm}$  substituindo os valores em  $d \geq 3\sqrt{\frac{32 * M}{\pi * \eta * \sigma_{esc}}}$ .

Assim, adota-se  $d=25\text{mm}$ . A tensão de cisalhamento máxima é  $\tau_{máx} = \frac{3}{4} * \left( \frac{Q_{máx}}{A} \right) = \frac{3}{4} * \left( \frac{600}{\pi * 25^2} \right) = 0,407\text{MPa}$ . Dessa forma, a  $\tau_{máx}$  é muito menor do que o cisalhamento máximo ( $\sim 70\text{MPa}$ ).

O diâmetro interno do rolamento( $di$ ) deve ser tal que  $\sigma_{máx} = \frac{Fc}{A} = \frac{4 * Fc}{\pi * di^2} \leq \eta * \sigma_{esc}$ . Portanto, “ $di$ ” deve ser maior ou igual a  $5,3\text{mm}$ .

Embora o eixo foi dimensionado com um valor mínimo para proporcionar estabilidade, deve-se considerar o desvio lateral do centro de gravidade do conjunto equipamento-ciclista. Segundo estudos ergométricos, o desvio lateral máximo de um ciclista é de  $150\text{mm}$ . Este desvio é notado tanto durante o exercício quanto em situações limites, como subidas e descidas da bicicleta. Assim, o tamanho total da base paralela ao eixo deve medir no mínimo  $400\text{mm}$ (vide figura abaixo) para que o centro de gravidade esteja sempre projetado sobre o aparelho, impedindo que este vire.

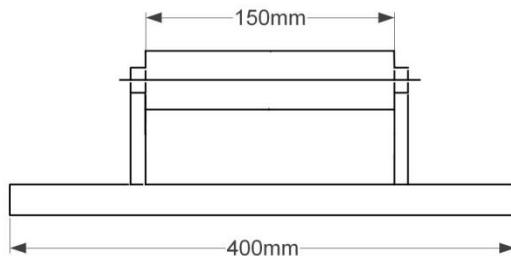


Figura 20 - Base de suporte ao eixo e mancais

#### 4.1.3. Mancais de rolamento para o eixo

O tipo rolamento escolhido foi o rígido de uma carreira de esferas devido à pequena dimensão do eixo, do preço vantajoso e porque pode suportar cargas radiais, bem como axiais, nas ordens de grandeza requisitadas pelo projeto. O rolamento foi escolhido a partir das especificações: diâmetro interno( $di$ ) entre  $5,3\text{mm}$  e  $25\text{mm}$ , carga radial máxima de  $575\text{N}$ , carga axial de  $205\text{N}$ , temperatura de operação normal e lubrificado com graxa.

Deseja-se determinar a capacidade de carga básica dinâmica (C) para a determinação do rolamento. A carga básica dinâmica depende da carga dinâmica equivalente (P), do número médio de rotações por minuto (n) e da vida nominal (Lh) segundo a equação (14).

$$C = P * \sqrt[3]{\frac{60 * n * Lh}{10^3}} \quad (14)$$

Inicialmente deve-se calcular a carga dinâmica equivalente:

$$P = F_r, \text{ quando } \frac{F_a}{F_r} = e; \quad (15)$$

$$P = X * F_r + Y * F_a, \text{ quando } \frac{F_a}{F_r} > e. \quad (16)$$

$F_r$ : componente radial da carga

$F_a$ : componente axial da carga

e: valor limite

X e Y: fatores de carga

Para determinar os valores de “e”, “X” e “Y” deve-se analisar o conjunto de rolamentos com as dimensões desejadas após a escolha do tipo de rolamento. Por meio da tabela de fatores de cálculo do fabricante determinou-se que  $e = 0,345$  para

$F_r = 600N$ ,  $F_a = 205N$  considerando o conjunto de rolamentos analisados. Como

$\frac{F_a}{F_r} = 0,36$  é maior do que “e” deve-se utilizar a equação (16) com  $X=0,46$  e  $Y=1,59$

conforme a tabela do fabricante. Assim, a carga dinâmica (P) é aproximadamente 600N.

Considerando que um indivíduo normal pelada com velocidade de rotação entre 90 e 100 rpm. Portanto, adota-se  $n=95$  rpm. No caso da determinação da vida nominal, considera-se um uso diário do equipamento de 10 horas por um período de 20 anos resultando em  $Lh=10h/dia \times 365 dias \times 20 anos = 73\,000$  horas. Portanto, conforme a equação (14)  $C=4,5kN$ . Para q o rolamento seja alojado em uma caixa escolheu-se os da linha Y do fabricante. Nessa linha o menor rolamento possui  $d=12mm$  e  $C=9,56kN$ , o que está de acordo com os parâmetros de projeto. Na tabela 7 e figura 21 estão as especificações do rolamento escolhido.

Tabela 7 - Especificações do rolamento Y, YAR 2-2F

| Dimensões principais | Capacidades de carga |      |      | Carga limite de fadiga $C_0$ | Velocidade limite para tolerância de eixo h6 | Massa |      |      |
|----------------------|----------------------|------|------|------------------------------|--|-------|------|------|
|                      | D mm                 | D mm | B mm | C kN                         | P <sub>u</sub> kN                            | r/min | kg   |      |
| 12                   | 40                   | 27   | 12   | 9,56                         | 4,75   | 0,2   | 9500 | 0,11 |

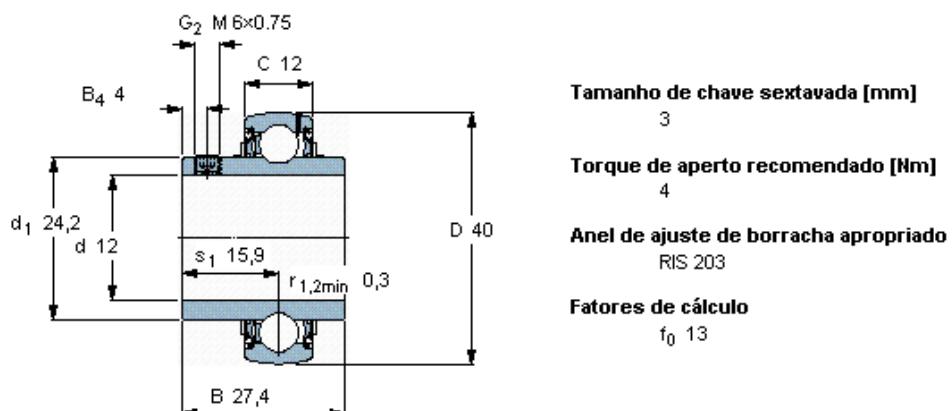


Figura 21 - Especificações do rolamento

A partir do rolamento escolhido, determinou-se a caixa para apoiar e fixar o conjunto eixo-rolamento sobre a estrutura, vide especificações na tabela 8 e figura 22.

Tabela 8 - Especificações da unidade do mancal reto do rolamento Y, caixa fundida

| D mm | A mm | H mm | H <sub>1</sub> mm | L mm | Massa kg | Unidade de rolamento | Caixa    | Rolamento     |
|------|------|------|-------------------|------|----------|----------------------|----------|---------------|
| 12   | 32   | 57   | 30,2              | 127  | 0,52     | SY 12 TF             | SY 503 M | YAR 203/12-2F |

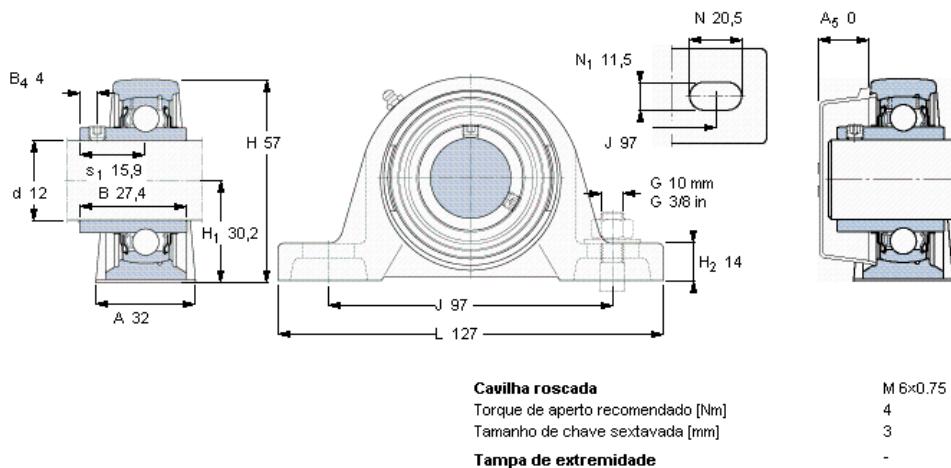


Figura 22 - Especificações da unidade de mancal

#### *4.1.4. Base da estrutura*

A unidade de mancal é parafusada em um pequeno degrau de aço interíço que é parafusado na base da estrutura(vide figura 23). As tensões nessa peça são muito baixas, pois ela é interíça. Portanto, os cálculos não serão detalhados nesse relatório.

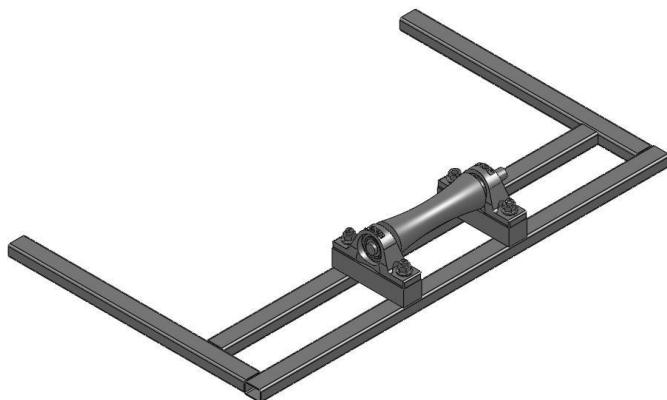


Figura 23 - Base da estrutura

A base da estrutura é feita a partir da soldagem de tubos retangulares de aço com seção 30x20mm e 1,5 de espessura. Esta foi uma decisão econômica, pois não há a necessidade de um material mais leve, é um perfil pequeno e é utilizado em outra parte da estrutura o que reduz o custo visto que os tubos são vendidas em metros. A força vertical em cada rolamento, que é aproximadamente 600N, é distribuída em uma área de 30x60. Portanto, a tensão normal ao tubo é aproximadamente 0,4MPa que é muito menor do que a tensão de escoamento do aço , e portanto, o perfil está de acordo com as solicitações.

#### *4.1.5. Barras laterais*

As barras laterais sofrem compressão, resultante das forças  $X_b$  e  $Y_b$ , e fletem devido ao movimento do centro de gravidade e à pré carga aplicada no eixo da bicicleta. Conforme relatado anteriormente, o desvio lateral máximo de um ciclista é 150mm. Considera-se que o ciclista deslocou, com distância máxima, seu centro de gravidade para a esquerda (vide vista de trás da bicicleta na figura 24). Portanto, a força peso estará a uma distância de 75mm do plano da roda. Nesta situação foi criada uma força  $F_I$  para equilibrar o momento causado pelo mudança de posição do centro de gravidade. Assim, a soma dos momentos em relação ao eixo normal ao desenho no ponto de contato da roda com o eixo é nula e, portanto,  $P*75 - F_I*R = 0$ .

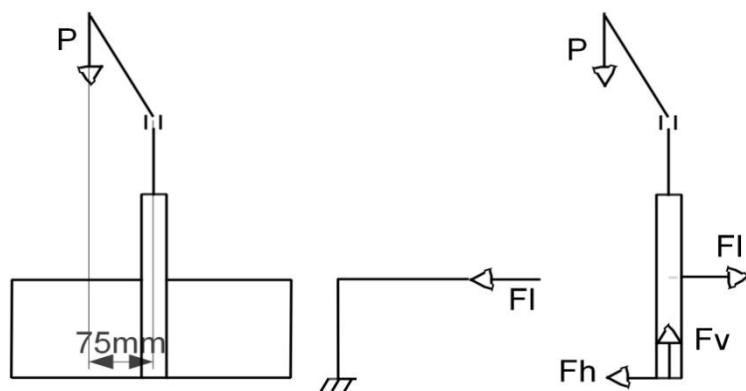


Figura 24 - Forças externas (vista de trás da bicicleta)

Para  $R = R_{máx}$ ,  $F_I = 263\text{N}$  e, para  $R = R_{min}$ ,  $F_I = 405\text{N}$ .

Para a análise, também, deve-se considerar a compressão da barra  $F_b$  que é a soma vetorial de  $X_b$  e  $Y_b$ . Para  $R = R_{máx}$ ,  $F_b = 378,7\text{N}$  e, para  $R = R_{min}$ ,  $F_I = 145,8\text{N}$ . As forças aplicadas em uma das barras laterais podem ser representadas, conforme o esquema da figura 25, de duas formas em uma vista normal ao plano formado pelo "U" das barras laterais.

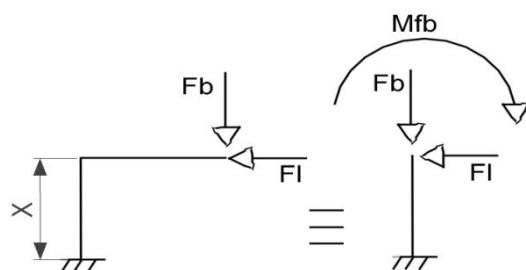


Figura 25 - Forças aplicadas em uma das barras laterais

Devido às dimensões do equipamento e com o intuito de economizar, utilize-se o mesmo perfil de tubo retangular utilizado na base da estrutura. Foi realizado um estudo no SolidWoks das barras conforme o esquema acima para verificar a resistência da estrutura. A figura 26 representa as tensões de Von Mises obtidas.

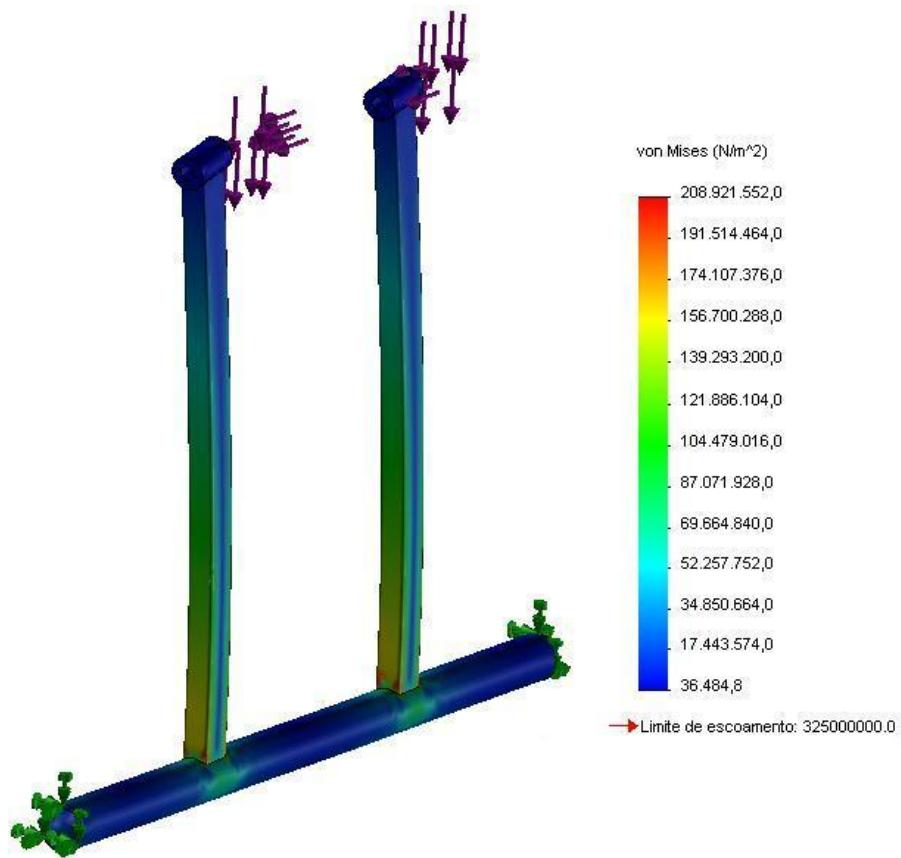


Figura 26 - Tensões de Von Mises nas barras laterais

Com esse estudo foi constatado que o fator de segurança é muito baixo( $FS=1$ ), pois a tensão máxima está próxima ao limite de escoamento. Para o fator de segurança seja maior, serão adicionados dois reforços internos às barras laterais formando pequenos triângulos na parte inferior. Ao serem tracionados os reforços irão impedir que as tensões na base das barras sejam da ordem de grandeza das obtidas pelo estudo da figura 26.

#### 4.1.6. Acoplamento da roda

O eixo da roda é acoplado na ponta superior das barras laterais através de dois parafusos, um em cada ponta, que pressionam as extremidades do eixo. Na ponta de cada parafuso há uma peça cilíndrica, vide figura 27, que encaixa na porca, de tamanho padrão, localizada na extremidade do eixo da roda. Algumas bicicletas não possuem porcas nas extremidades dos eixos de suas rodas, mas estas são caras e não foram consideradas devido ao local de implementação do mecanismo, o centro comunitário, que, provavelmente, não possuirá bicicletas desse tipo.



Figura 27 - Peça do mecanismo de encaixe no eixo da bicicleta

Realizou-se, no programa SolidWorks, um estudo da peça que fica presa no parafuso e que encaixa na porca. A figura 28 representa as tensões de Von Mises obtidas.

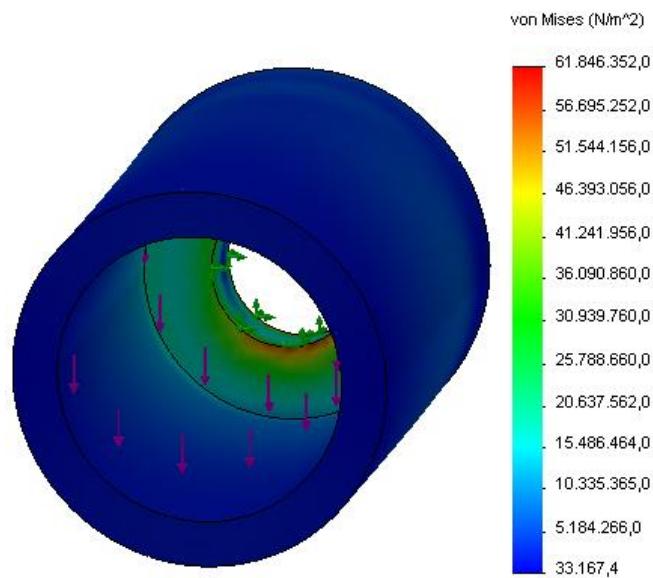


Figura 28 - Tensões de Von Mises no acoplamento do eixo da roda

Conforme os resultados o fator de segurança é bem alto ( $FS=25$ ) e, portanto, o dimensionamento está de acordo com os parâmetros do projeto.

#### *4.1.7. Montagem*

A montagem das peças foi feita no programa SolidWorks e durante esse procedimento verificou-se a necessidade do aumento de certas medidas, como o tamanho da base devido o tamanho do motor, mas nenhum desses aumentos prejudicou a estrutura. Abaixo, na figura 29, o desenho da estrutura final.

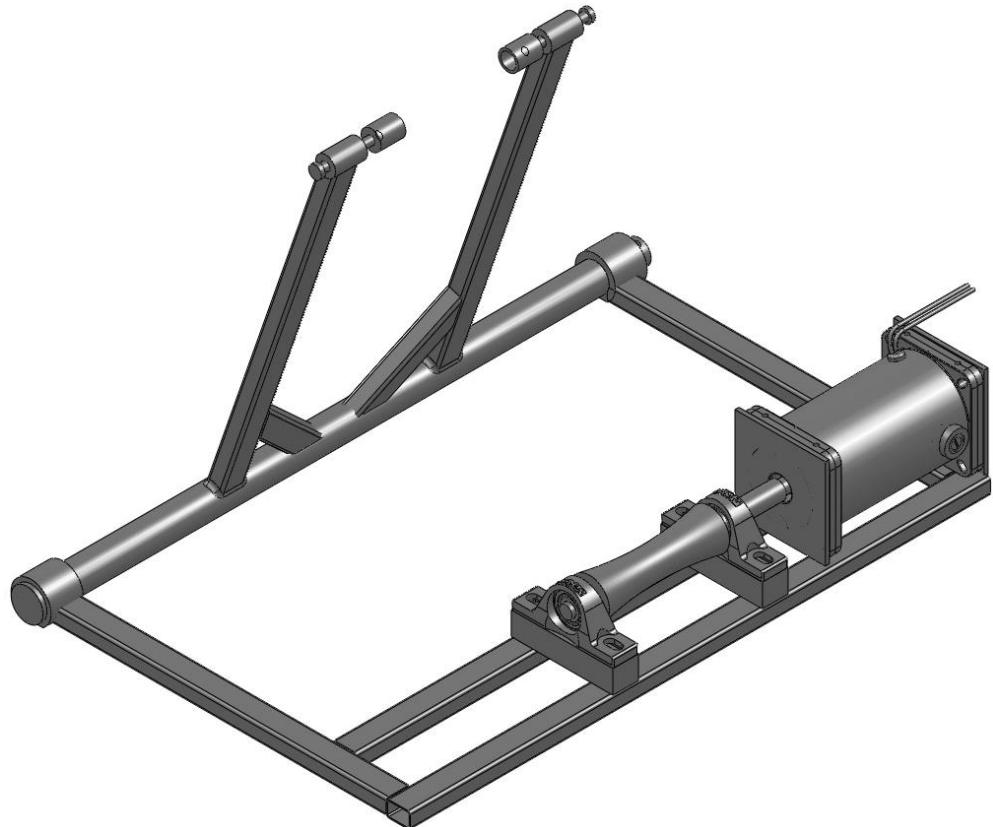


Figura 29 - Estrutura ao final dos cálculos

## 4.2. Projeto elétrico

### 4.2.1. Escolha do gerador

O recuperador elétrico é uma parte vital do sistema. Ele é diretamente responsável pela eficiência do aparelho. Para a definição do tipo de gerador a ser usado, serão considerados alguns princípios simples de acionamentos:

- a. Conversões AC / DC geram perdas de energia;
- b. Geradores de fluxo induzido perdem mais energia que os de ímãs permanentes;
- c. Reduções mecânicas geram perdas de energia.

Partindo-se destes princípios, descarta-se o gerador AC, pois seu fluxo é induzido, a implementação exige um conversor para o sistema de armazenamento DC e custo maior do que algumas tecnologias DC. Desta forma, duas soluções são possíveis para a escolha do projeto, gerador DC com escovas e alternador.

No Gerador DC, escovas fazem a comutação da excitação das bobinas, criando um dipolo que faz o rotor girar. Nesta arquitetura, a tensão de saída é relativamente simples de tratar, pois é continua e proporcional à velocidade angular. No caso da saída para o sistema de armazenamento, uma simples regulação de tensão é necessária.



Figura 30 - Motor / Gerador DC

No alternador, não se usa escovas para comutar a tensão, sendo esta, portanto, alternada. Porém, a maioria dos modelos já incluem uma ponte retificadora de fabrica). Além disso, o alternador trabalha com fluxo induzido (bobina ao invés de imã permanente), o que permite gerar uma tensão constante, independente da rotação (o sistema de controle também é interno ao gerador). Esta característica é muito interessante. Porém, a maioria da produção destes aparelhos é destinada à industria automotiva, e portanto estes trabalham com rotações nominais da ordem de 1500 rpm, sendo que o rendimento cai bastante para rotações fora desta faixa. Desta forma, o alternador apresenta uma estreita faixa de operação ótima.



Figura 31 - Alternador

A tabela abaixo resume o estudo:

Tabela 9 - Resumo: Estudo das soluções de recuperador

| Arquitetura       | Vantagens                | Desvantagens                      |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| <b>Gerador DC</b> | Barato                   | Requer manutenção                 |
|                   | Boa Eficiência           | Comutação pode causar fiscamento  |
|                   | Tensão simples de tratar | (altas velocidades)               |
| <b>Alternador</b> | Tensão constante         | Fluxo Induzido (menor rendimento) |
|                   |                          | Estreita faixa de operação        |

Analizando os custos, embora o gerador DC apresente um custo reduzido, a fonte chaveada para a potência esperada (em torno dos 100W) representaria um custo adicional de R\$300,00 ao projeto. Certamente poder-se ia comprar um de segunda mão, mas esta escolha não seria interessante do ponto de vista de uma futura produção em escala. Além do fato das fontes chaveadas terem um

rendimento que dificilmente ultrapassa 80%. Considerando esses aspectos, o alternador de carro mostrou-se a melhor escolha, pois:

- a. O alternador tem um regulador de tensão interno, não necessitando de uma fonte extra;
- b. O alternador carregará a partir de rotações mais baixas que o conjunto gerador DC e fonte chaveada, pois este necessita de um giro mínimo para fornecer o threshold de tensão da fonte.

Desta forma, optou-se por usar um alternador, que custou R\$ 70,00 em segunda mão e mais R\$ 30,00 de recondicionamento. Caso o projeto passe para fase de produção em escala, poder-se-á adquirir facilmente mais alternadores por preços semelhantes, ou até mesmo mais baratos.

Vale ressaltar que, apesar dos fatores considerados, espera-se uma eficiência menor do que a alternativa de utilização do motor DC, pelas questões já abordadas de perdas no rotor do alternador, que não existem no caso do gerador DC.

#### 4.2.2. Especificação

Aliando-se as conclusões acima encontradas ao projeto mecânico, chega-se às especificações desejáveis para o gerador.

Os sistemas de armazenamento, em especial as baterias, têm uma tensão de entrada de geralmente 12 volts. De maneira análoga, a maioria dos alternadores de carro, para os parâmetros deste projeto, tem esta tensão nominal de saída. Assim, escolheu-se 12 Volts como tensão nominal.

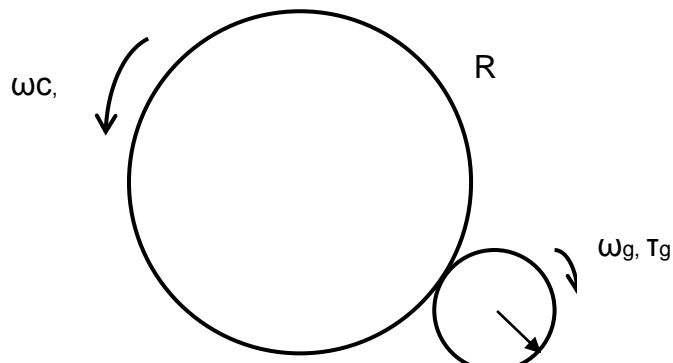


Figura 32 - Esquema de rotação da rode e do eixo

No esquema da figura 32, pode-se deduzir a rotação e a potência necessárias ao eixo. A velocidade de rotação do eixo de potência  $\omega_c$  é dada por  $\omega_g = \omega_c * \left(\frac{R}{r}\right)$ .

Portanto,  $f_g = f_c * \left(\frac{R}{r}\right) = 60 \text{ Hz}$ , assim, a rotação nominal é 3600 rpm.

Por último, a potência fornecida deve-se igualar à potência do ciclista. Desconsidera-se a potência perdida em transmissão (que, no caso, é baixa por não haver reduções), assim  $Pot_g = Pot_c = 100 \text{ W}$ .

Da mesma maneira, a partir de  $Pot_g = \omega_g * \tau_g$  pode-se obter o torque nominal  $\tau_g = \frac{Pot_g}{\omega_g} = 0,27 \text{ N} * \text{m} = 2,4 \text{ lb} * \text{in.}$

#### 4.2.3. Sistema de armazenagem de energia

Para o armazenamento da energia produzida propõem-se dois métodos: um super capacitor ou uma bateria. Novamente, o fator decisivo nesta escolha é a relação custo / eficiência. Primeiramente, vale ressaltar que todas arquiteturas de armazenamento introduzem perdas ao sistema. A situação ideal seria descartar este intermediário, à exemplo de vários equipamentos existentes no mercado. A título de exemplo, existe uma bicicleta ergométrica vendida junto à um televisor, que permite o usuário assistir à programação enquanto pedala. Porém, dado o escopo do projeto, esta solução não foi avaliada, visto que o uso em centros comunitários requer a flexibilidade de poder pedalar e usar a energia em tempos distintos.

Super capacitores são capacitores de grande capacidade (ordem de alguns Faraday). Estes equipamentos são os mais eficientes em termos energéticos, com eficiência próxima de 95%, porém possuem duas desvantagens. Primeiramente, sua tensão não é constante, como é o caso da bateria. Devido a esse fato, um circuito de saída que controla a tensão é necessário, que por sua vez gera perdas. Além disso, estes dispositivos são extremamente caros, fugindo do escopo do projeto.

Desta maneira, as baterias aparecem como a solução mais viável. Para a carga do exercício (em torno de 60 Ah), é aconselhável o uso de baterias de chumbo. A eficiência destas gira em torno dos 85%. Caso a energia disponível fosse

menor, o mais aconselhável seria o uso de baterias tipo Níquel-Cadmio, que apresentam maior vida útil e são menos danosas para o meio ambiente. Pode-se considerar que o uso de baterias de chumbo cria a necessidade de reposição da mesma, e consequentemente uma destinação correta. Porém, novas tecnologias permitem uma vida útil bastante prolongada, como as baterias de automóvel.

#### 4.2.4. Circuito elétrico

O alternador possui 3 terminais, um polo positivo do estator ( $B+$ ), um polo de realimentação do estator ( $D+$ ) e o polo do rotor. O primeiro é ligado no polo positivo da bateria e o polo negativo da mesma é ligado à carcaça do alternador. O polo de realimentação é ligado no polo do rotor em série a uma chave e uma lâmpada. Esta última é necessária pois sua resistência limita a tensão de realimentação. Na figura 33, a representação do circuito.

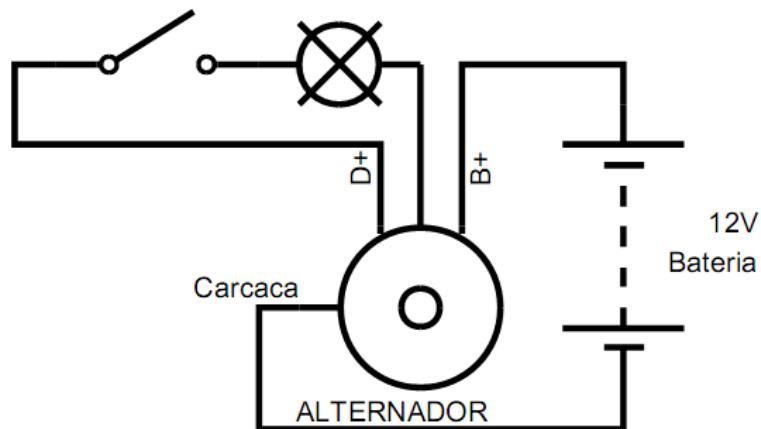


Figura 33 - Circuito elétrico

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Construção do protótipo

#### 5.1.1. Modificações iniciais

A estrutura mecânica foi projetada para a utilização de um gerador DC devido aos cálculos iniciais, porém após o levantamento de preços escolheu-se o alternador. Portanto, como consequência modificou-se o suporte do alternador, a adicionou-se um perfil retangular na base e elevou-se a posição do eixo traseiro.

Confrontando o projeto à realidade do laboratório, o grupo fez duas alterações no protótipo, nos reforços da barras laterais e nos mancais de acoplamento do eixo dianteiro.

Os suportes laterais, projetados em perfil retangular, foram substituídos por chapas (figura 34), por ser difícil o corte e as soldas angulares no perfil. A mudança não afetou a rigidez da estrutura.

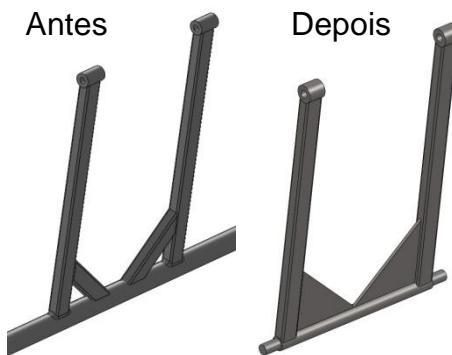


Figura 34 - Comparaçāo das barras laterais

Os mancais de acoplamento do eixo dianteiro, inicialmente em formato cilíndrico, seriam de difícil fabricação sem uma fresadora CNC. O grupo então

resolveu alterar o formato para cilindros, mais facilmente fabricáveis com uma plaina simples, vide comparação na figura 35. Na nova geometria, o eixo ficou deslocado de 30 mm para cima. Porém, os cálculos de esforços não apresentaram significante variação. A alteração foi, portanto, viável.

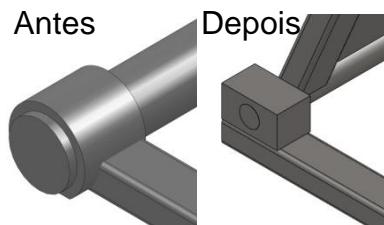


Figura 35 - Comparação dos mancais de acoplamento do eixo dianteiro

O protótipo final alterado é mostrado na figura 36. Os desenhos de fabricação do mesmo encontram-se no Anexo C.

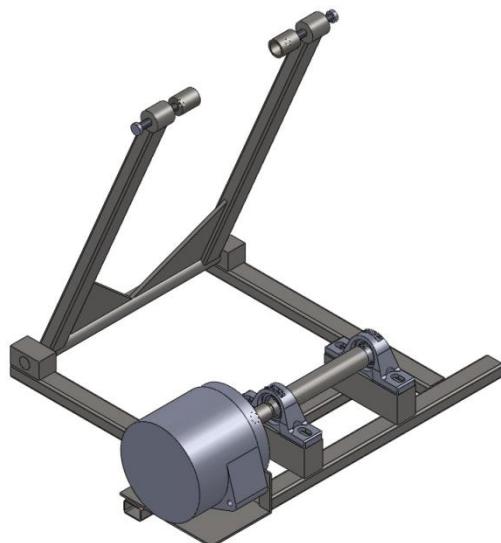


Figura 36 - Protótipo final alterado

### *5.1.2. Aquisição de material*

Definida a estrutura, listou e adquiriu-se os materiais.

Peças em aço:

- a. Perfil retangular para a base e garfo;
- b. Tarugo para eixos traseiro e dianteiro;
- c. Tarugo para Acoplamentos Estrutura-Bicicleta;
- d. Blocos para mancais e suporte do eixo;
- e. Chapas.

Peças estruturais:

- a. Parafusos diversos e arruelas;
- b. Rolamentos;
- c. Suporte para rolamentos;
- d. Cupilha.

Conversor

- a. Alternador

### *5.1.3. Usinagem e Soldagem*

A fabricação, propriamente dita, foi iniciada pela estrutura da base. Para tal cortou-se os perfis retangulares e os soldou juntamente com o suporte do alternador, que é uma placa dobrada com um rasgo e dois furos, conforme figura abaixo.

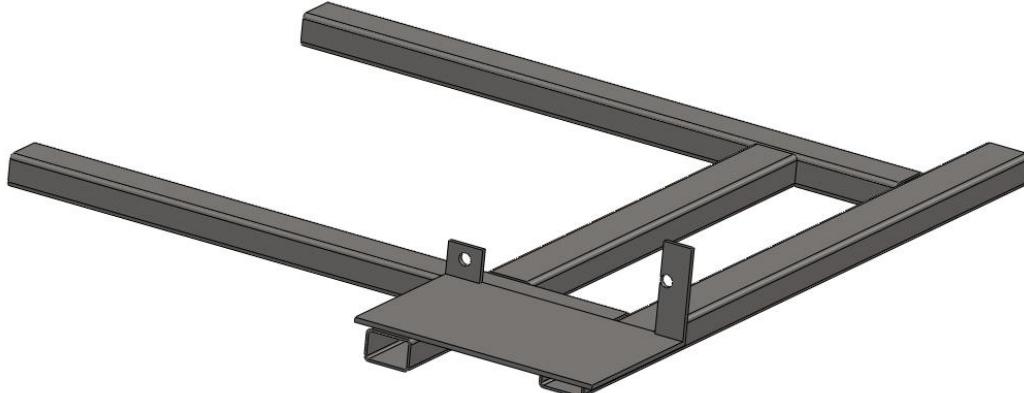


Figura 37 - Base da estrutura

Torneou-se o eixo dianteiro e os mancais de passagem dos parafusos de acoplamento à bicicleta, nos últimos faz-se roscas M10. Perfis e chapas triangulares foram cortados. Todas essa estruturas foram soldadas formando as barras laterais, figura 38.



Figura 38 - Barras laterais

Para os mancais do eixo dianteiro foi feita a plainagem de dois blocos em formato retangular. Em seguida fez-se os furos para a passagem do eixo dianteiro e para fabricar as roscas M5 que servem de fixação à base.

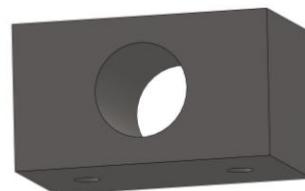


Figura 39 - Mancal dianteiro

O eixo traseiro foi torneado com o diâmetro nominal e os rebaixos. Para o acoplamento do eixo no alternador torneou-se no diâmetro nominal e fez-se quatro furos, dois para encaixar nos eixos e dois para cupilhas.

O cilindro de acoplamento no eixo da bicicleta foi torneado no diâmetro nominal e duas furações realizadas, uma para o encaixe no eixo e outra para fabricação da rosca M10. Por fim, suportes para os dois mancais foram cortados e retificados para alinhar o eixo traseiro ao eixo do alternador.

#### 5.1.4. Montagem

Após a usinagem e soldagem, o protótipo foi montado utilizando-se parafusos, arruelas, dois rolamentos e cupilhas. Na figura 40, o protótipo construído no momento em que se acopla a roda traseira de uma bicicleta.



Figura 40 - Protótipo construído

A estrutura ao final da montagem é rígida. Os acoplamentos permitem a movimentação suave e com pouca folga. Detalhes dos acoplamentos nas figuras 41 e 42.



Figura 41 - Detalhe do acoplamento do eixo da bicICLETA



Figura 42 - Detalhe do mancal do eixo da frente

### 5.1.5. Custos

Para a fabricação de um protótipo os gastos somam aproximadamente 300 reais, conforme a tabela 10. Componentes como bateria e suporte para os rolamentos foram emprestados e não impactaram nos custos, mas se os considerarmos o gasto total dobra. Também deve-se considerar que em caso de produção em larga escala esses valores se reduziriam.

Tabela 10 - Custos do projeto

| Material                      | Valor(R\$)    |
|-------------------------------|---------------|
| perfil de aço 1020 de 30x20mm | 48,00         |
| barras de aço 1020            | 23,00         |
| tarugo de aço 1020            | 8,00          |
| tarugo de aço 1045            | 12,00         |
| chapa de aço 1020             | 10,00         |
| 2 rolamentos                  | 52,00         |
| suporte para rolamentos       | -             |
| parafusos, arruelas e cupilha | 9,00          |
| alternador                    | 100,00        |
| fio                           | 4,00          |
| chave                         | 1,00          |
| lâmpada                       | 1,00          |
| bateria                       | -             |
| <b>total</b>                  | <b>268,00</b> |

## 5.2. Resultados

### 5.2.1. Testes

O primeiro teste a ser realizado foi o de análise da estrutura mecânica com o objetivo de verificar se a mesma atendia às especificações. O encaixe da roda da bicicleta no protótipo mostrou-se seguro e a bicicleta permaneceu equilibrada mesmo durante uma pedalada intensa.

Foi constatado que o mecanismo se mostrava desconfortável quando a roda traseira não havia sido fixada corretamente na posição vertical. Portanto, durante o acoplamento da roda deve-se buscar o posicionamento vertical da roda. Também é necessário verificar se o acoplamento do alternador está devidamente fixado, pois no início do teste não estava e o movimento apresentava trancos.

No teste do protótipo, que visa verificar o rendimento e energia gerada pelo mesmo, foram medidas as grandezas corrente e tensão na bateria e batimento cardíaco do ciclista.



Figura 43 - Teste do protótipo

O teste, figura 43, foi iniciado com o circuito elétrico desligado e após o ciclista manter a pedalada constante ligou-o. No momento em que o circuito elétrico é ligado o ciclista sente uma dificuldade maior para pedalar devido ao campo induzido no alternador. Devido a esse fato, verificou-se que a utilização do equipamento com bicicletas sem marcha é inviabilizada.

A partir dos dados, obtidos com um intervalo de 30 segundos, calculou-se a potência média e a energia total produzidas que correspondem, respectivamente, a 7watts e 3350J, conforme a tabela 11.

Tabela 11 - Potência e Energia calculas a partir das tensões e correntes medidas durante o teste

| Tempo<br>s | Tensão<br>V | Corrente<br>A | Potência<br>watts | Energia<br>J |
|------------|-------------|---------------|-------------------|--------------|
| 15         | 13,2        | 1,22          | 16                | 483          |
| 45         | 13,5        | 0,14          | 1,9               | 56,7         |
| 75         | 13,4        | 1,16          | 15                | 466          |
| 105        | 13,5        | 0,47          | 6,3               | 190          |
| 135        | 13,3        | 0,25          | 3,3               | 99,8         |
| 165        | 13,5        | 0,70          | 9,5               | 283          |
| 195        | 13,7        | 0,44          | 6,0               | 181          |
| 225        | 13,5        | 0,19          | 2,6               | 77,0         |
| 255        | 13,4        | 0,32          | 4,3               | 129          |
| 285        | 13,6        | 0,52          | 7,1               | 212          |
| 315        | 13,5        | 0,80          | 11                | 324          |
| 345        | 13,5        | 0,20          | 2,7               | 81,0         |
| 375        | 13,7        | 0,20          | 2,7               | 82,2         |
| 405        | 13,7        | 0,51          | 7,0               | 210          |
| 435        | 13,7        | 0,43          | 5,9               | 177          |
| 465        | 13,7        | 0,73          | 10                | 300          |
| Total      |             |               | -                 | 3350         |
| Média      |             |               | 7,0               | -            |

Com o objetivo de analisar o rendimento do processo mediu-se as freqüências cardíacas e o gasto calórico do ciclista em intervalos de 30 segundos, cujos valores estão listados na tabela 12. O valor total de energia gasta corresponde a 120800J.

Tabela 12 - Energia gasta pelo ciclista durante o teste

| <b>Tempo</b> | <b>Batimento</b> | <b>Energia</b> |
|--------------|------------------|----------------|
| <b>S</b>     | <b>por min.</b>  | <b>J</b>       |
| <b>15</b>    | 127              | 6062           |
| <b>45</b>    | 138              | 6587           |
| <b>75</b>    | 145              | 6921           |
| <b>105</b>   | 152              | 7255           |
| <b>135</b>   | 154              | 7350           |
| <b>165</b>   | 154              | 7350           |
| <b>195</b>   | 158              | 7541           |
| <b>225</b>   | 160              | 7637           |
| <b>255</b>   | 163              | 7780           |
| <b>285</b>   | 167              | 7971           |
| <b>315</b>   | 166              | 7923           |
| <b>345</b>   | 167              | 7971           |
| <b>375</b>   | 168              | 8018           |
| <b>405</b>   | 169              | 8066           |
| <b>435</b>   | 171              | 8162           |
| <b>465</b>   | 171              | 8162           |
| Total        |                  | 120800         |

O rendimento do processo, comparando a energia obtida na bateria em relação à gasta pelo ciclista conforme o gráfico 1, é 3%. Segundo Gilmore(2008), a eficiência máxima já obtida em experimentos é de 25%. A disparidade com este valor será discutida adiante.

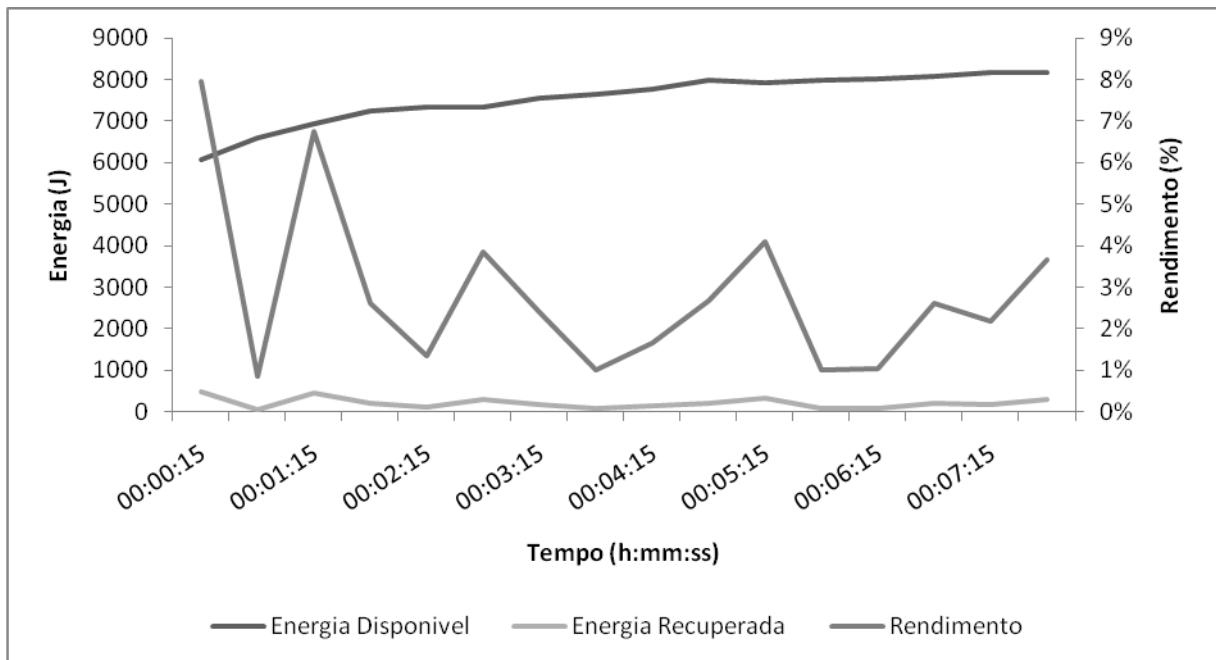


Figura 44 - Comparação das energias disponíveis e recuperada

### 5.2.2. Implantação em um centro comunitário

Na discussão inicial sobre a implantação em centros comunitários, questões relevantes foram levantadas. Nesta seção, discutir-se-ão as mais relevantes.

Inicialmente, o peso da estrutura obtida é elevado, principalmente devido ao alternador. Visando uma boa versatilidade e facilidade de armazenamento, poderiam se considerar alternativas para se diminuir o peso. Por exemplo, a estrutura poderia ser remodelada em alumínio. Esta solução seria viável, pois se notou uma rigidez elevada no protótipo, o que gera margem para otimização no cálculo estrutural e possibilidade de substituição de aço por materiais mais leves.

Considerando uma alta rotatividade de usuários no centro comunitário, à título de comparação, será adotada uma utilização diária de 10 equipamentos em 4 horas durante 30 dias. Portanto, em 1200 horas por mês com uma potência média de 7watts gera-se 8,4kWh. Com essa produção média mensal pode-se iluminar uma sala e utilizar um laptop ou utilizar o aparelho de som, a TV de plasma e a bomba d'água, por exemplo. Conseqüentemente, para um centro comunitário sem aparelhos elétricos de potência elevada, como geladeira, chuveiro elétrico e

ventiladores, é possível gerar energia equivalente a um quarto do consumo mensalmente.

No tocante da eficiência, é importante notar que, para projetos sociais, o montante inicial de investimento não é tão importante quanto o custo variável do projeto. Neste sentido, trocar o alternador de automóvel por um motor DC, apesar de impactar o custo da máquina em R\$200, seria interessante, visto que o custo de manutenção (maior custo variável) não seria alterado significativamente.

Desta forma, sugerem-se duas alterações para a implantação em centros comunitários, otimização da estrutura para diminuição de peso e substituição do alternador de automóvel por gerador DC com fonte chaveada. Porém, estes não são considerados excpcionais se o objetivo for a utilização de uma fonte complementar de energia.

### *5.2.3. Sugestões para trabalhos futuros*

A eficiência energética, embora boa em termos absolutos, não atingiu o patamar das máquinas altamente eficientes citadas em Gilmore(2008). O grupo acredita que uma melhoria do projeto para trabalhos futuros poderia vir neste sentido.

Para explicar o fenômeno, volta-se à escolha do conversor energético. Durante a fase de projeto, ponderou-se as eficiências e os custos entre o gerador DC e o alternador de automóvel. Este último foi escolhido por questões financeiras. Enquanto um alternador custa R\$100, a arquitetura gerador DC acoplada a uma fonte chaveada custaria ao menos R\$300. É natural que, nestas condições, o alternador ofereça um menor rendimento. Explicar-se-á a razão.

Um alternador tem uma curva de eficiência como a esquematizada no gráfico 1.

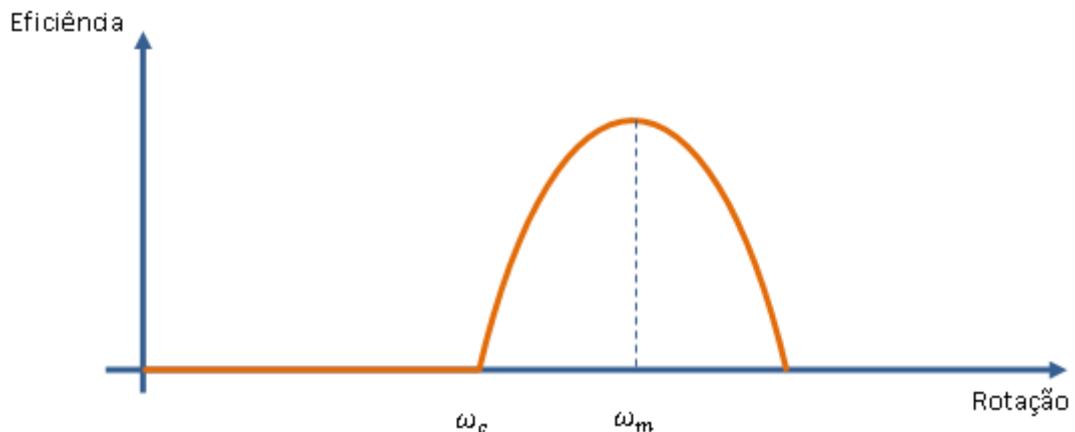


Figura 45 - Curva de eficiência do alternador

Nota-se que existe uma rotação de corte,  $\omega_c$ , por volta dos 1200 rpm, a partir da qual o alternador funciona, encontrando-se o máximo de eficiência em torno de  $\omega_m$ , perto dos 3200 rpm. Para tais valores, a eficiência equipara-se a de um gerador DC, embora ligeiramente mais baixa devido às perdas na indução do rotor.

Quando o alternador entra em funcionamento, a carga para o usuário aumenta consideravelmente, e este não consegue chegar na zona de máxima eficiência. Esse fato inviabiliza a mudança da relação de transmissão entre o eixo movido pela roda e o eixo do alternador para alcançar velocidades com maior eficiência, pois acarretaria no aumento de carga no pedal do usuário. Desta forma, para atual construção, não é possível a um usuário médio obter rendimentos próximos aos máximos estipulados por Gimore(2008).

Visto que este é um problema do alternador em si, e de seu projeto visando usar tração de motores robustos, pouco poderia ser feito para ajustar o rendimento obtido. A solução para tal seria de se implementar a alternativa de gerador DC, arcando-se com o maior custo de produção.

Porém, vale ressaltar que, mesmo com a eficiência obtida, o protótipo produz suficiente energia para alimentar pequenos aparelhos eletrônicos, como mp3 players, celulares e outros.

## COMENTÁRIOS FINAIS

Na comparação com o planejamento, nota-se que a parte de estudos do centro comunitário, não prevista inicialmente, diminuiu a margem de tempo. Não obstante, houve dificuldade na escolha do conversor eletro-mecânico, pois ambas arquiteturas apresentavam vantagens.

Segundo os testes, a estrutura mecânica final do protótipo é rígida e o exercício é de grande intensidade devido a forças de indução. A potência média obtida durante os testes permite a utilização da energia gerada em aparelhos de baixa potência.

A implantação desse equipamento em um centro comunitário é viável caso o objetivo seja aliar atividades físicas à uma fonte complementar de energia. Mudanças no projeto podem ser implementadas com o objetivo de reduzir o peso do equipamento e aumentar sua eficiência.

A eficiência do processo é relativamente baixa devido à faixa de rotações que se impõe ao alternador. A solução alternativa para projetos futuros seria a utilização do gerador DC, arcando-se com o maior custo de produção.

O projeto mostrou-se uma grande fonte de aprendizado. Pode-se desenvolver a totalidade de um projeto em engenharia mecatrônica, desde a análise de requisitos até a fase de testes, passando-se pelo projeto mecânico, elétrico, modelagem, fabricação, fornecedores, testes e documentação.

O grupo ficou satisfeito não somente com o aprendizado, mas também com os resultados obtidos. Melhorias puderam ser propostas e a finalização do processo permitiu a cobertura de diversas áreas do conhecimento no campo da engenharia.

## REFERÊNCIAS<sup>1</sup>

*ALTERNATOR and Generator Comparison for Wind Power.* Disponível em: <[http://www.otherpower.com/otherpower\\_wind\\_alternators.html](http://www.otherpower.com/otherpower_wind_alternators.html)>. Acesso em: 10 maio 2010.

BIOPHAN TECHNOLOGIES. **West Henrietta.** West Henrietta, 2005. 2 p.  
EHOW. *Types of Bike Trainers.* Disponível em: <[http://www.ehow.com/about\\_5408065\\_types-bike-trainers.html](http://www.ehow.com/about_5408065_types-bike-trainers.html)>. Acesso em: 31 maio 2010.

ELETROBRAS. **Consumo médio mensal de eletrodomésticos.** Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br/elb/procel/main.asp?TeamID={32B00ABC-E2F7-46E6-A325-1C929B14269F}#>>. Acesso em: 15 maio 2010.

GILMORE, Adam M.. Human Power: Energy Recovery from Recreational Activity. **Guelph Engineering Journal**, Guelph, p. 8-16. jan. 2008.

IHRSA. *11th Annual IHRSA / Fitness Latin American Conference & Trade Show.* Disponível em: <<http://cms.ihrsa.org/index.cfm?fuseaction=page.viewPage.cfm&pageId=18915>>. Acesso em: 15 mar. 2010.

KYMISSIS, John. *Parasitic Power Harvesting in Shoes.* AGOSTO 2008- Departamento de Physics And Media Group, Mit, Cambridge, Usa. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.29.3794&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2010.

LEWANDOWSKI, Beth. *Human power generation in space.* 2007. Glenn Research Center, Nasa.

---

<sup>1</sup> De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

ORLANDO, Bart; KING, Todd; MUELLER, Mark. *CCAT human energy converter*. Disponível em: <[http://www.appropedia.org/CCAT\\_human\\_energy\\_converter](http://www.appropedia.org/CCAT_human_energy_converter)>. Acesso em: 03 maio 2010.

*PEDAL Power*. Disponível em: <<http://www.humboldt.edu/~ccat/pedalpower/>>. Acesso em: 03 maio 2010.

POWERS, Howley. *Exercise physiology: Theory and application to fitness and performance*. 2004. McGraw Hill Companies, New York.

SKF. Catálogo de Engenharia Interativo. Disponível em: <<http://www.skf.com/portal/skf/home/products?newlink=first&lang=pt>>. Acesso em: 06 junho 2010.

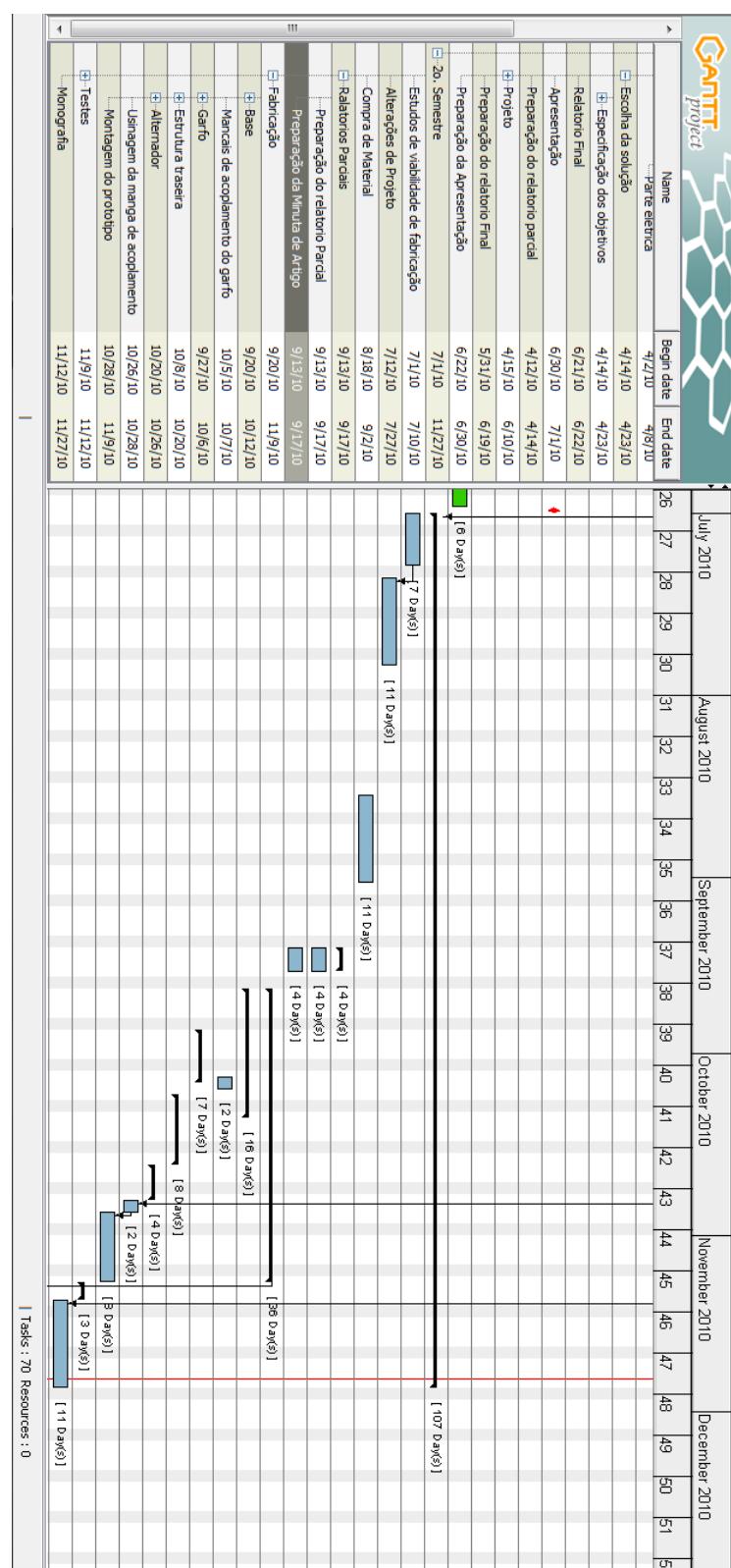
SONEIRA, Raymond M.. **Comparison of CRT, LCD, Plasma, DLP and LCoS Technologies**. Disponível em: <[http://www.displaymate.com/ShootOut\\_Comparison.htm](http://www.displaymate.com/ShootOut_Comparison.htm)>. Acesso em: 28 maio 2010.

STEVENS, John; COREY, Garth. *A Study of Lead-Acid Battery Efficiency Near Top-of-Charge and the Impact on PV System Design*. Photovoltaic System Applications Department, Sandia National Laboratories.

ULTIMATE. *Pedal Powered Television*. Disponível em: <[http://www.los-gatos.ca.us/davidbu/pedgen/ultimate\\_pedal\\_tv.html](http://www.los-gatos.ca.us/davidbu/pedgen/ultimate_pedal_tv.html)>. Acesso em: 03 maio 2010.

## **ANEXOS**

## ANEXO A - Cronograma (Diagrama Gantt)



## ANEXO B - Rotinas de cálculo em Matlab

```
%Calculo de L e X dado um H e beta
para um valor de R
H =7;
beta=1.1
R=38.5; %neste caso R=Rmax

L=cos(beta)*2*R+H/tan(beta)
X=R+H/sin(beta)
a=sqrt(H^2+L^2);
gama=atan(H/L);
teta=acos((X^2+a^2-R^2)/(2*X*a));
alfa=teta+gama
b=L-H/tan(alfa);
t=X-H/sin(alfa);
beta=acos((R^2+b^2-t^2)/(2*R*b))
betaD=beta*180/pi

%Calculo de beta para R=Rmáx dados
H,L,X (obtidos anteriormente)
Rmax=38.5;

tetaRmax=acos((X^2+a^2-
Rmax^2)/(2*X*a));
alfaRmax=tetaRmax+gama
alfaDRmax=alfaRmax*180/pi
bRmax=L-H/tan(alfaRmax);
tRmax=X-H/sin(alfaRmax);
betaRmax=acos((Rmax^2+bRmax^2-
tRmax^2)/(2*Rmax*bRmax))
betaDRmax=betaRmax*180/pi

%Calculo de beta para R=Rmin dados
H,L,X (obtidos anteriormente)
Rmin=25;

tetaRmin=acos((X^2+a^2-
Rmin^2)/(2*X*a));
alfaRmin=tetaRmin+gama
alfaDRmin=alfaRmin*180/pi
bRmin=L-H/tan(alfaRmin);
tRmin=X-H/sin(alfaRmin);
betaRmin=acos((Rmin^2+bRmin^2-
tRmin^2)/(2*Rmin*bRmin))
betaDRmin=betaRmin*180/pi

%Calculo das reações
P=1350;

%para R
Xb=P/(2*(tan(alfa)+tan(beta)));
Xc=Xb
Yb=Xb*tan(alfa)
Yc=Xc*tan(beta)

%para Rmax
XbRmax=P/(2*(tan(alfaRmax)+tan(betaRmax)));
XcRmax=XbRmax
YbRmax=XbRmax*tan(alfaRmax)
YcRmax=XcRmax*tan(betaRmax)

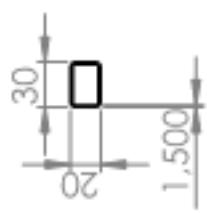
%para Rmin
XbRmin=P/(2*(tan(alfaRmin)+tan(betaRmin)));
XcRmin=XbRmin
YbRmin=XbRmin*tan(alfaRmin)
```

$$Y_{cRmin} = X_{cRmin} * \tan(\beta_{Rmin})$$

**ANEXO C - Desenhos Mecânico**



|   |   |
|---|---|
| Qtd:  | 02                                      |
| Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde                       |   |
| Departamento de<br>Engenharia Mecatrônica e<br>Sistemas Mecânicos | Perito:<br>Perfil da BL                 |
|   | CLASSE DE TOLERÂNCIA:<br>NBR ISO 2768-C |
|   | MATERIAL: Aço 1020                      |
|   | DATA: 30/11/2010                        |
|   | Escola Politécnica da USP               |
|   | PROJALIA:1:5                            |



A

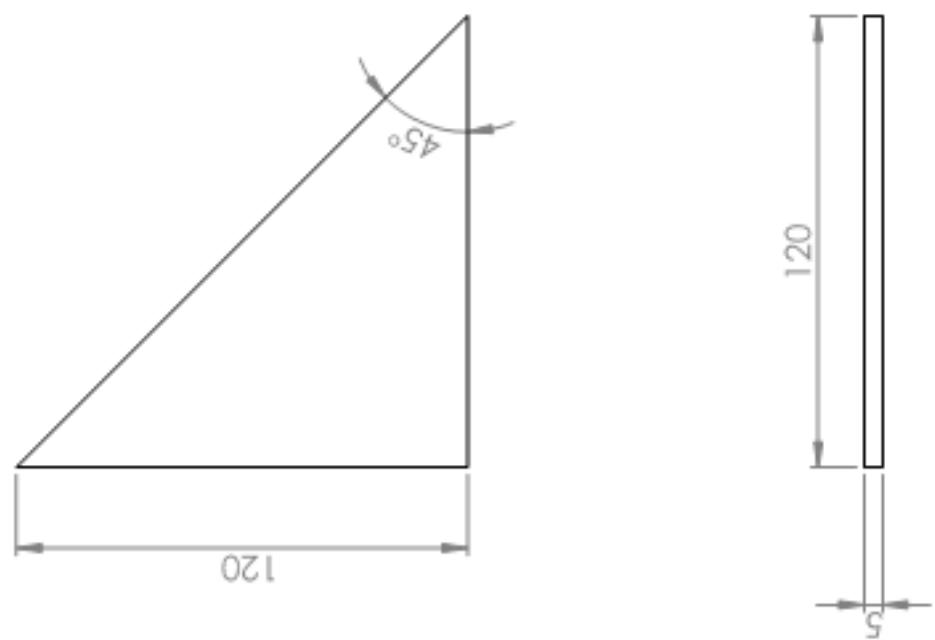
B

C

D

|                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| Guia:                 | 02               |
| Classe de tolerância: | A4               |
| Pesca:                | Cantoneira da BL |
| NBR ISO 2768-C        |                  |
| MATERIAL: Aço 1020    | COLHA 2 DE 15    |
| DATA: 30/11/2010      | ESCALA 1:2       |

**Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde**



6  
5  
4  
3  
2  
1

B

C

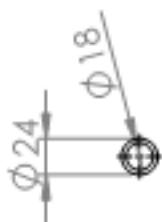
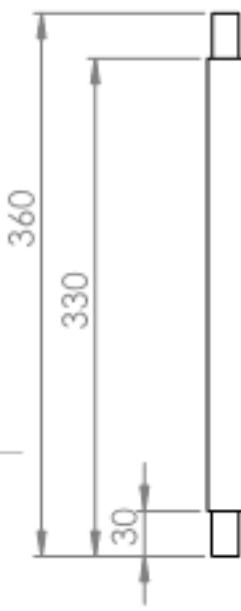
A

B

C

D

|  |  |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |
|--|--|-----------|-------------------------|-------|------------|-----------------------|----------------|-----------|----------|---------|-----|--|----------------------|-------|------------|-----------------------|----------------|-----------|----------|---------|-----|
|  | <p><b>Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">MATERIAL:</td> <td style="width: 50%;">Escala Padrônica da USP</td> </tr> <tr> <td>DATA:</td> <td>30/11/2010</td> </tr> <tr> <td>CLASSE DE TOLERÂNCIA:</td> <td>NBR ISO 2768-C</td> </tr> <tr> <td>MATERIAL:</td> <td>Aço 1020</td> </tr> <tr> <td>ESCALA:</td> <td>1:1</td> </tr> </table><br><table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Departamento de Engenharia Mecânica e Sistemas Mecânicos</td> <td style="width: 50%;">Peça: Cilindro da BL</td> </tr> <tr> <td>DATA:</td> <td>30/11/2010</td> </tr> <tr> <td>CLASSE DE TOLERÂNCIA:</td> <td>NBR ISO 2768-C</td> </tr> <tr> <td>MATERIAL:</td> <td>Aço 1020</td> </tr> <tr> <td>ESCALA:</td> <td>1:1</td> </tr> </table> | MATERIAL: | Escala Padrônica da USP | DATA: | 30/11/2010 | CLASSE DE TOLERÂNCIA: | NBR ISO 2768-C | MATERIAL: | Aço 1020 | ESCALA: | 1:1 | Departamento de Engenharia Mecânica e Sistemas Mecânicos | Peça: Cilindro da BL | DATA: | 30/11/2010 | CLASSE DE TOLERÂNCIA: | NBR ISO 2768-C | MATERIAL: | Aço 1020 | ESCALA: | 1:1 |
| MATERIAL:  | Escala Padrônica da USP  |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |
| DATA:  | 30/11/2010   |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |
| CLASSE DE TOLERÂNCIA:                                    | NBR ISO 2768-C   |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |
| MATERIAL:  | Aço 1020   |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |
| ESCALA:  | 1:1  |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |
| Departamento de Engenharia Mecânica e Sistemas Mecânicos | Peça: Cilindro da BL   |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |
| DATA:  | 30/11/2010   |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |
| CLASSE DE TOLERÂNCIA:                                    | NBR ISO 2768-C   |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |
| MATERIAL:  | Aço 1020   |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |
| ESCALA:  | 1:1  |           |                         |       |            |                       |                |           |          |         |     |  |                      |       |            |                       |                |           |          |         |     |



**Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde**

MIL:

01

A4

CLASSE DE TOLERÂNCIA:  
NBR ISO 2768-C

MATERIAL: Aço 1020

Departamento de  
Engenharia Mecatrônica e  
Sistemas Mecânicos

Eixo da BL

Data: 30/11/2010

Escola Politécnica da USP

D

CLASSE DE TOLERÂNCIA:  
NBR ISO 2768-C

A4

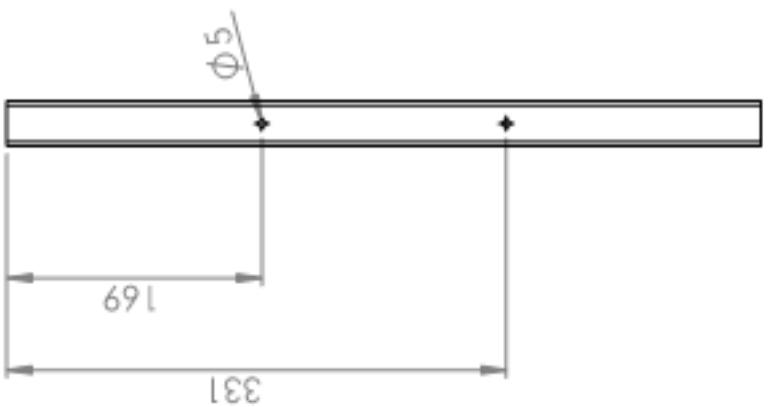
CLASSE DE TOLERÂNCIA:  
NBR ISO 2768-C

MATERIAL: Aço 1020

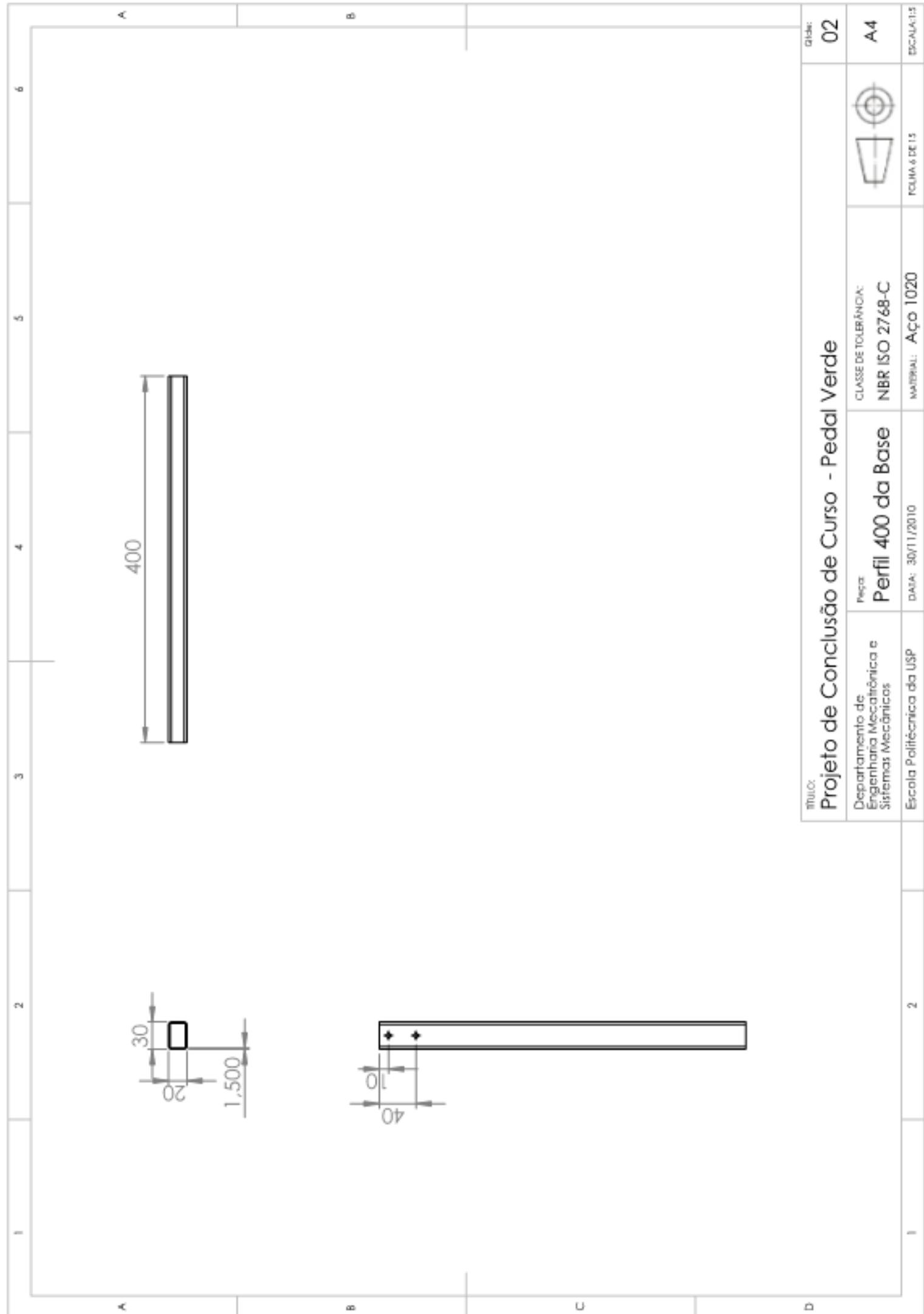
TOLHA 4 DE 15

ESCALA: 1:5

|   |   |
|---|---|
| Qtd:  | 01                                      |
| Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde                       |   |
| Departamento de<br>Engenharia Mecatrônica e<br>Sistemas Mecânicos | Perfis:<br><b>Perfil 500 da Base</b>    |
|   | CLASSE DE TOLERÂNCIA:<br>NBR ISO 2768-C |
|   | MATERIAL: Aço 1020                      |
|   | DATA: 30/11/2010                        |
|   | Escola Politécnica da USP               |
|   | PROJALIA:1:5                            |









A

B

C

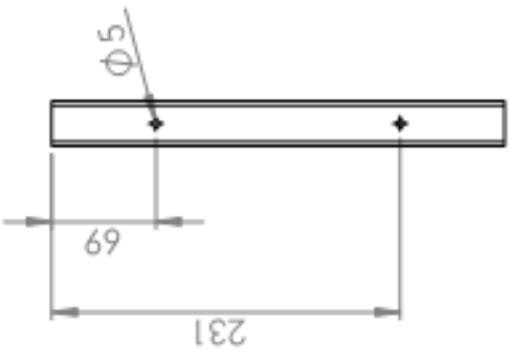
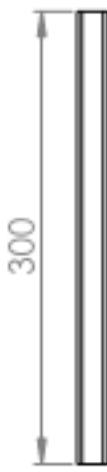
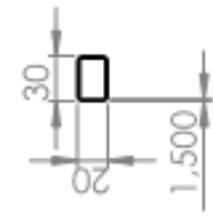
5  
6

4

3

2

1



### Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde

MUL:

02

A4



CLASSE DE TOLERÂNCIA:

NBR ISO 2768-C

Perfil 300 da base

A4

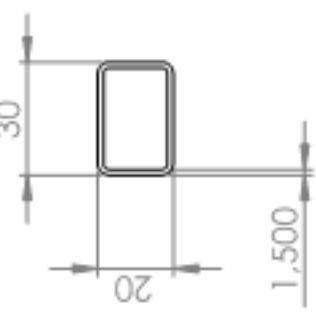


POLIA 7 DE 15

BCAL/A-15

|   |                    |   |               |
|---|--------------------|---|---------------|
| Departamento de<br>Engenharia Mecatrônica e<br>Sistemas Mecânicos | Perfis             | CLASSE DE TOLERÂNCIA:<br>NBR ISO 2768-C |               |
| Escola Politécnica da USP   | Perfil 300 da base | MATERIAL: Aço 1020                      | POLIA 7 DE 15 |
|   |                    | DATA: 30/11/2010                        | BCAL/A-15     |





|   |  |   |   |   |   |   |
|---|--|---|---|---|---|---|
| 1 |  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|--|---|---|---|---|---|

|   |  |   |  |   |  |
|---|--|---|--|---|--|
| A |  | B |  | C |  |
|---|--|---|--|---|--|

## Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde

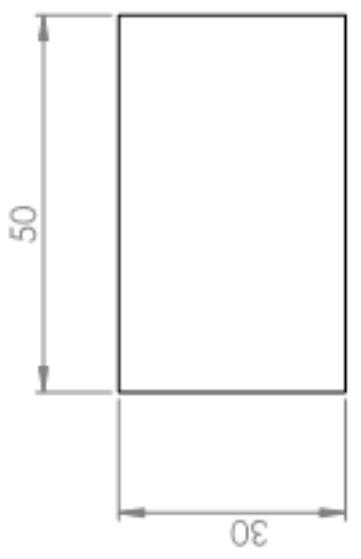
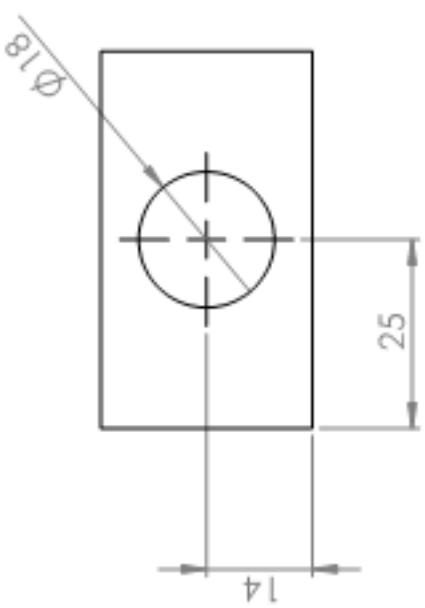
MUL:

|   |                                      |   |              |
|---|--------------------------------------|---|--------------|
| Departamento de<br>Engenharia Mecatrônica e<br>Sistemas Mecânicos | Perfis:<br><b>Perfil 105 da base</b> | CLASSE DE TOLERÂNCIA:<br>NBR ISO 2768-C | 01           |
| Escola Politécnica da USP   | Data: 30/11/2010                     | MATERIAL: Aço 1020                      | A4           |
|   |                                      | TOLHIA 8 DE 15                          | ESCALA: 1:10 |



|   |                    |
|---|--------------------|
| Qtd:  | 02                 |
| Classe de tolerância:   | A4                 |
| Pasta:  | ESCALA A/11        |
| Marcal diantero   | NBR ISO 2768-C     |
| Departamento de<br>Engenharia Mecatrônica e<br>Sistemas Mecânicos | Data: 30/11/2010   |
| Escola Politécnica da USP   | MATERIAL: Aço 1020 |
|   | POSSUA 9 DE 15     |

**Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde**

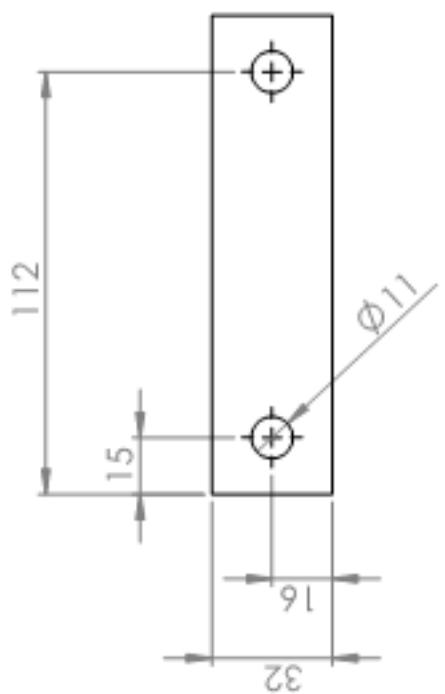
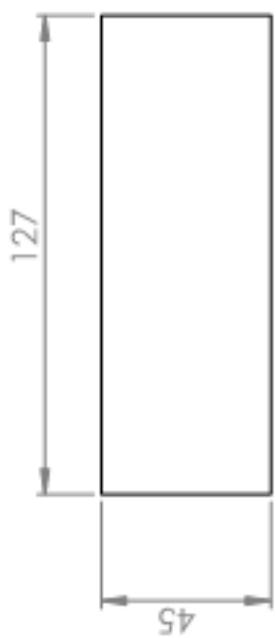


A 6  
5  
4  
3  
2  
1

B  
50  
30

C  
6  
5  
4  
3  
2  
1





**Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde**

Departamento de  
Engenharia Mecatrônica e  
Sistemas Mecânicos

Pesca  
**Bloco da base**

CLASSE DE TOLERÂNCIA:  
NBR ISO 2768-C

DATA: 30/11/2010

MATERIAL: Aço 1020

TOLEMA 10 DE 15

QSD:

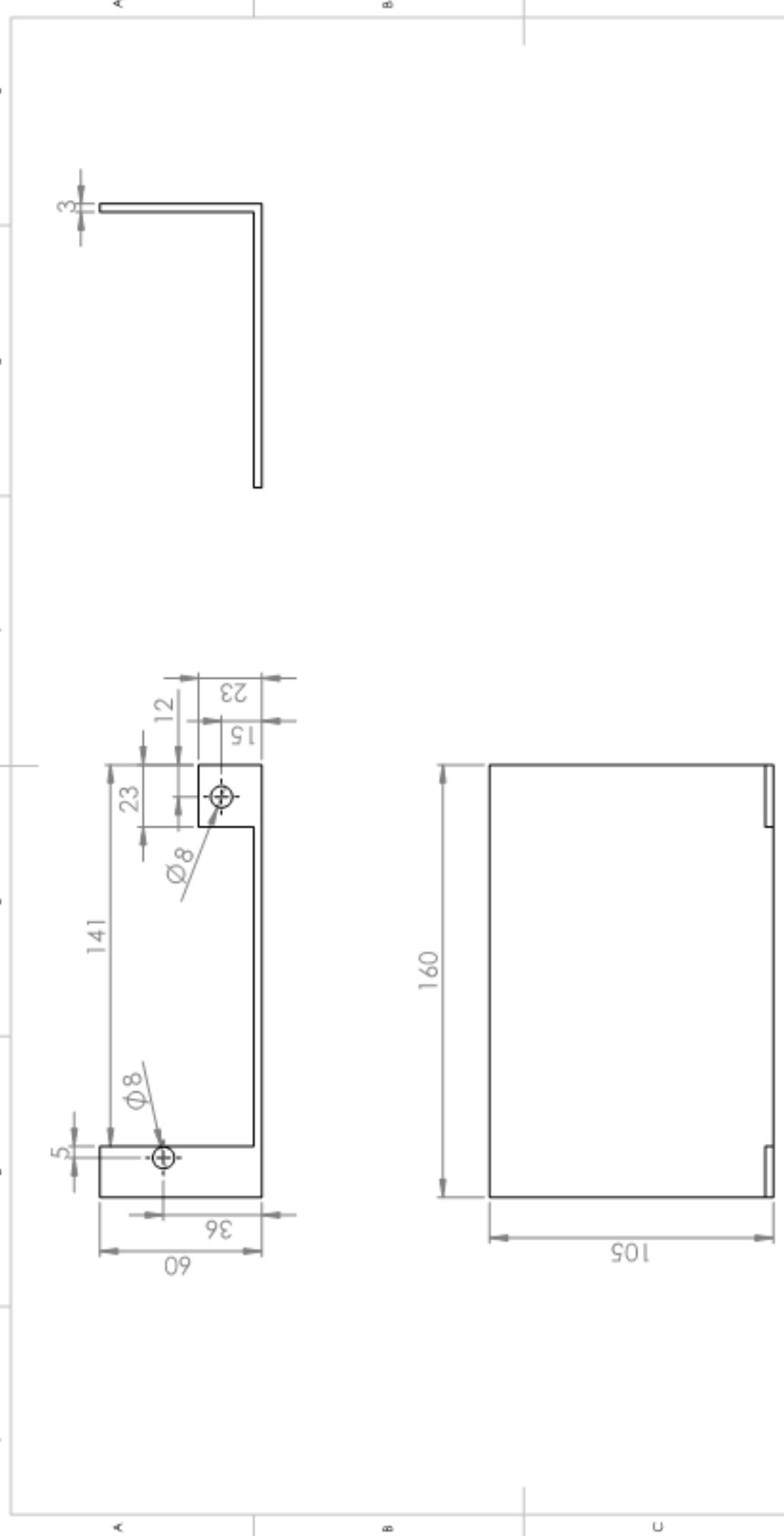
02

A4

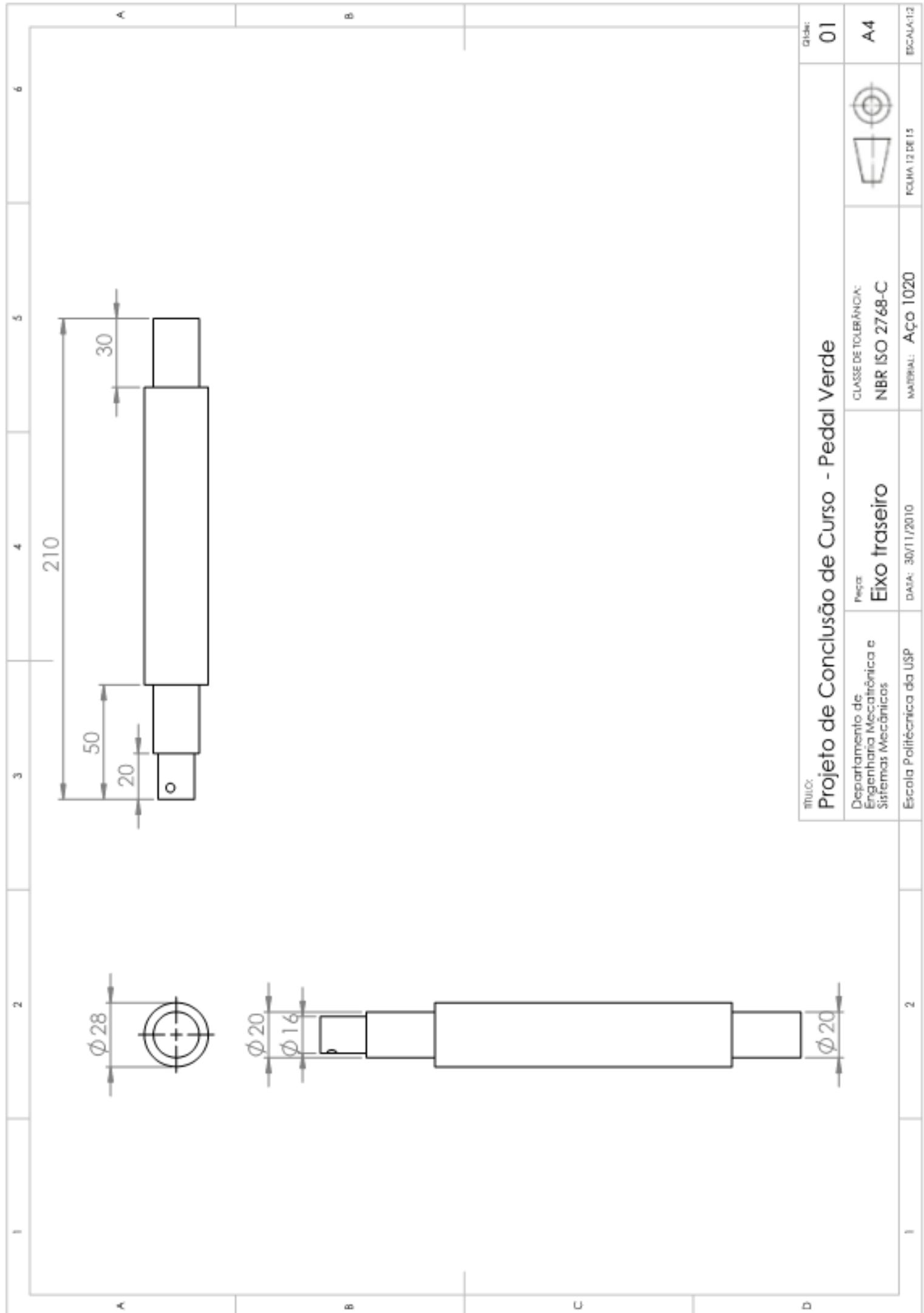
ESCALA: 1:1



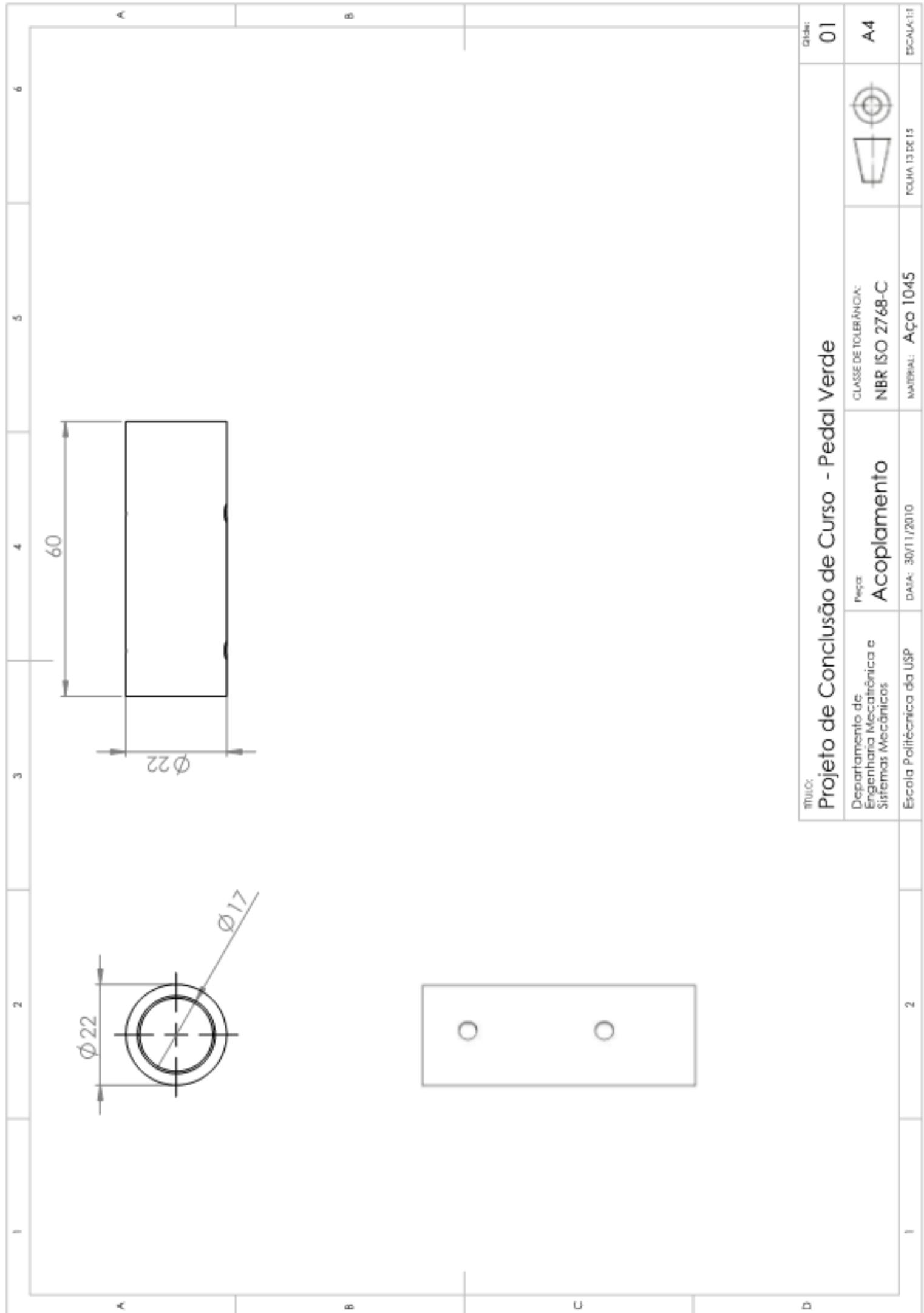
|   |              |
|---|--------------|
| Qtd:  | 01           |
| Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde                       | A4           |
| Departamento de<br>Engenharia Mecatrônica e<br>Sistemas Mecânicos | ESCALA: 1:10 |
| Pesq:   | 01           |
| CLASSE DE TOLERÂNCIA:<br>NBR ISO 2768-C                           | 01           |
| Material: Aço 1020  | 01           |
| Data: 30/11/2010  | 01           |
| Escola Politécnica da USP   | 01           |
| I   | 2            |
| II  | 2            |













|  |   |         |    |   |                       |                           |                |   |                    |   |             |
|--|---|---------|----|---|-----------------------|---------------------------|----------------|---|--------------------|---|-------------|
|  | <p><b>Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">Márcio:</td> <td style="width: 25%;">02</td> </tr> <tr> <td>Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos</td> <td>CLASSE DE TOLERÂNCIA:</td> </tr> <tr> <td>Escala Politécnica da USP</td> <td>NBR ISO 2768-C</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">1</td> <td>MATERIAL: Aço 1045</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">2</td> <td>ESCALA: 1:1</td> </tr> </table> | Márcio: | 02 | Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos | CLASSE DE TOLERÂNCIA: | Escala Politécnica da USP | NBR ISO 2768-C | 1 | MATERIAL: Aço 1045 | 2 | ESCALA: 1:1 |
| Márcio:  | 02  |         |    |   |                       |                           |                |   |                    |   |             |
| Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos                        | CLASSE DE TOLERÂNCIA:   |         |    |   |                       |                           |                |   |                    |   |             |
| Escala Politécnica da USP  | NBR ISO 2768-C  |         |    |   |                       |                           |                |   |                    |   |             |
| 1  | MATERIAL: Aço 1045  |         |    |   |                       |                           |                |   |                    |   |             |
| 2  | ESCALA: 1:1   |         |    |   |                       |                           |                |   |                    |   |             |



**Projeto de Conclusão de Curso - Pedal Verde**

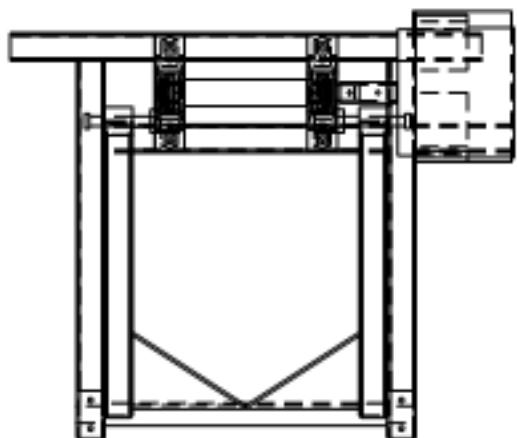
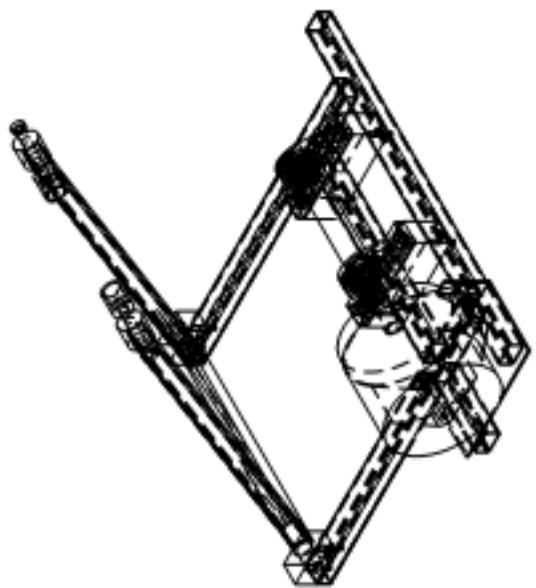
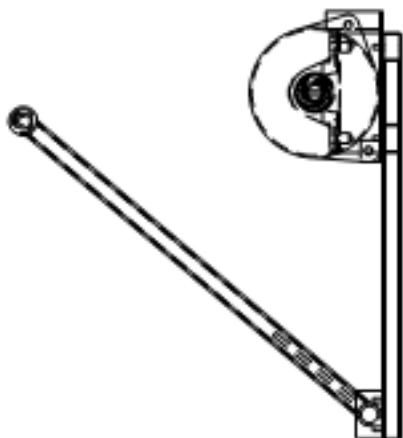
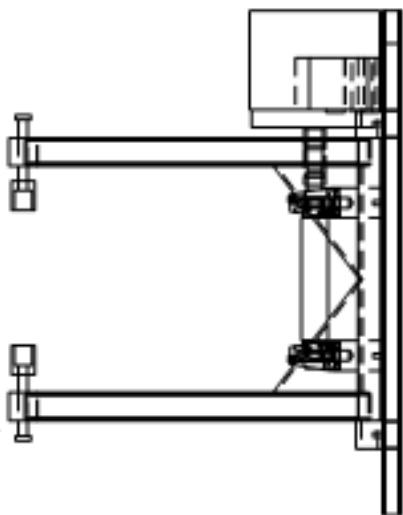
**Montagem**

Departamento de  
Engenharia Mecatrônica e  
Sistemas Mecânicos

DATA: 30/11/2010

A4

ESCALA:1:5



D

C

B

A