

Relatório Final de Iniciação Científica

Desenvolvimento da estrutura e dispositivos mecânicos do time de Futebol de Robôs da Categoria Small-Size da FEI – RoboFEI

Orientador: Flavio Tonidandel
Departamento: Ciência da Computação
Candidato: Fernando Perez Tavares
Nº FEI: 12.206.130-2

*Início: Outubro / 2006
Conclusão: Novembro / 2007*

RESUMO

O projeto visa desenvolver a estrutura e os dispositivos mecânicos da nova equipe de Futebol de Robôs do Centro Universitário da FEI, cuja categoria se denomina *Small-Size* [1], para futuras participações em competições nacionais e internacionais e também a sua utilização como uma plataforma de pesquisa. Neste trabalho serão mostradas as características dos robôs desta categoria, assim como algumas das regras da competição e um pouco de sua história. Foram estabelecidas metas para se criar um robô competitivo, com a possibilidade de futuras melhorias ou a implementação de novos dispositivos sem grandes ajustes.

1 Introdução

O projeto de Competições Robóticas, conhecido atualmente como RoboFEI, iniciou-se em 2003 com o intuito de promover a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico com os alunos de graduação e pós-graduação. Projetos em futebol de robôs vêm sendo desenvolvidos visando pesquisas na área de hardware, software, ou projeto mecânico. Atualmente em nossa equipe já foram concluídos em pouco mais de 3 anos, 4 iniciações científicas e 2 trabalhos de projeto de formatura, sendo que estas possibilitaram ao projeto ter um novo robô da categoria “*Very-Small*”, um novo sistema de visão computacional, um sistema de controle e uma estratégia de alto nível.

Este projeto de iniciação científica dará continuidade a esse trabalho já desenvolvido, passando para uma nova categoria, com novos desafios tecnológicos, tanto para o projeto mecânico quanto para o projeto elétrico, já que se trata de um robô mais complexo, que possui dispositivos mecânicos de chute, drible e um controle diferente já que será um robô omnidirecional [2].

1.1 Objetivo

O objetivo desta iniciação científica é projetar e desenvolver a estrutura mecânica do robô e seus dispositivos de chute, drible, juntamente com as rodas necessárias para um robô omnidirecional da categoria “*Small-Size*”, e também utilizar o robô como plataforma para futuras pesquisas dos alunos e professores da equipe.

1.2 Justificativa

Desde a criação da equipe de Futebol de Robôs na FEI e sua participação na categoria “*Very-Small*” [3], ela obteve ótimos resultados, sendo bicampeã brasileira, obtendo reconhecimento nacional. Para um desenvolvimento de novas tecnologias, abrindo um amplo campo de pesquisas para varias áreas como a Mecânica, Eletrônica e Ciência da Computação.

Essa nova categoria também é conhecida como F-180, pela sua limitação de tamanho (um cilindro de 180 mm de diâmetro com 150 mm de altura), incorpora tecnologias como sistemas de chute diversos, cruzamento da bola e de drible (retenção da bola junto ao robô). Com o desenvolvimento dessa nova categoria, permitimos que os alunos do grupo de pesquisa e os professores do projeto RoboFEI dominem essas novas tecnologias, elevando o projeto à um nível tecnológico mundial.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 O Futebol de Robôs

O futebol de robôs é uma forma de competição entre robôs, visando o aperfeiçoamento do controle individual de robôs móveis e da coordenação entre os robôs. A competição usa as regras do futebol, devidamente adaptadas.

Cada time é totalmente autônomo. Nenhuma intervenção humana é permitida após o início da partida. O número de robôs, seu tamanho, tamanho do campo e regras gerais variam de acordo com a liga que um time está ligado. Em 1993 foi criada a *Robocup* [4] que é um projeto mundial para o desenvolvimento da Inteligência Artificial, robótica e assuntos relacionados. A meta é que até o ano de 2050 a equipe campeã da categoria robótica jogue contra a seleção humana campeã mundial do mesmo ano [4]. Além disso, ela propõe que todas as pesquisas que foram realizadas sejam publicadas em Congressos que acontecem paralelamente às competições, para que os resultados sejam compartilhados, podendo ser aproveitados por outras equipes, aplicados na indústria ou em nosso cotidiano.

Ele serve também como campo de pesquisas com o foco de desenvolvimento de robôs móveis autônomos, cujo campo de atuação científica vem crescendo e ganhando destaque mundial, como por exemplo, as sondas de exploração espacial.

2.2 O Futebol de Robôs na FEI

O projeto de Futebol de Robôs na FEI começou em maio de 2003 somente como um grupo de pesquisas dedicado à simulação. Esse projeto foi iniciado pelo Profº. Reinaldo Bianchi, que participou do desenvolvimento dos times FUTEPOLI [5] e GUARANÁ [6], times de Futebol de Robôs de expressão nacional e internacional. O objetivo principal do projeto era o de desenvolver um time de futebol de robôs para participar da II IEEE Student Latin-American Robot Competition, que foi sediada em Bauru no mês de setembro de 2003, junto com o 6o. SBAI (Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente). O interesse era construir uma equipe de robôs para participar da categoria Mirosof, conhecida também como *Very-Small*, quando nasceu o projeto RoboFEI, coordenado pelos professores Flávio Tonidandel e Reinaldo Bianchi.

2.3 Visão Geral

O projeto mecânico é fundamental para que se consiga construir robôs eficientes e resistentes, sem que haja a necessidade de muitos ajustes após a sua concepção, pois isso além de encarecer o projeto, aumenta muito o seu tempo de execução.

Mas existem outras partes igualmente fundamentais para que possamos construir uma equipe. É necessário dividí-la em sub-projetos diferentes para que se consiga obter bons resultados em um tempo razoavelmente curto. Poderíamos dividir uma equipe da seguinte forma:

- Visão computacional, que capta a imagem de todo o campo de jogo e possibilita a localização e identificação dos jogadores e de cada elemento do jogo;
- Estratégia, que com as informações da visão, localiza e identifica cada robô do time adversário e a bola, e baseado nessas posições, avalia as possibilidades e toma uma determinada decisão de defesa ou ataque;
- Sistema de trajetória, que com as informações da visão e estratégia, define a trajetória que cada jogador deve ter em determinada situação, de modo a desviar de obstáculos, interceptar a bola, entre outras ações;

- Sistema de controle, que com as informações da trajetória, determina como cada robô deve ser acionado, controlando sua velocidade linear e angular de modo que este siga a trajetória previamente definida;
- Projeto mecânico, que projeta e constrói a estrutura de cada robô, seus componentes e dispositivos, conseguindo conciliar o espaço de acordo com as características das categorias;
- Projeto eletrônico, que projeta e constrói a interface eletrônica de cada robô, para que este receba as informações do controle, interprete e possa executá-las da maneira mais exata possível.

É importante ressaltar a importância do trabalho em conjunto dessas frentes, pois uma depende da outra, principalmente na construção física do robô, onde deve haver uma cooperação entre a eletrônica e o projeto mecânico para que não haja futuros problemas de montagem ou de operação.

2.4 Estrutura do Small-Size

O *Small-Size* é uma das várias categorias da RoboCup. Cada time pode possuir no máximo cinco jogadores para cada lado, onde um deles pode ser um goleiro. Cada robô deve respeitar as dimensões impostas pela regra. Ele não pode ultrapassar 180mm de diâmetro e não pode ter mais de 150mm de altura se estiver usando uma visão global (fig 1). Usando-se uma visão local, ele não pode ultrapassar 250mm de altura. Não pode haver nada em sua construção que possa danificar outro robô ou ferir alguma pessoa.

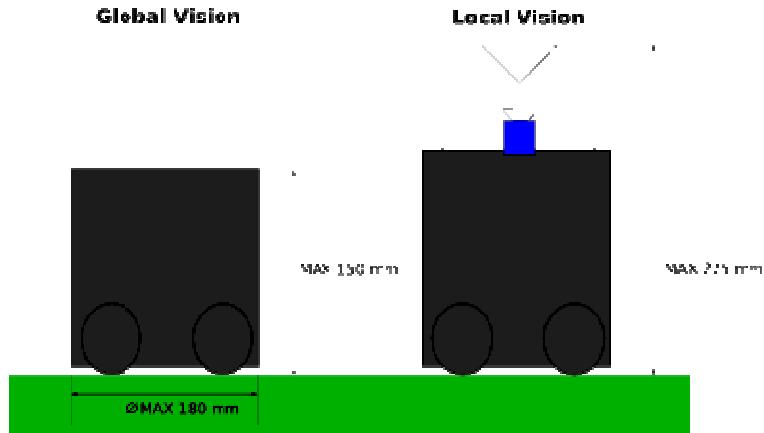


Figura 1: As máximas dimensões do robô [7]

Antes do inicio do jogo, cada time deve ter a sua cor definida, escolhendo o amarelo ou o azul. As marcações devem ser circulares com um diâmetro de 50 mm e o centro delas deve estar localizado no centro de cada robô, de modo que possa ser identificado pela outra equipe. Cada robô deve ser devidamente numerado, de modo que qualquer participante consiga ver e consiga identificar cada robô. O robô também não pode usar um meio de locomoção que danifique o piso. Para se comunicar com computadores externos, eles podem se comunicar através de rede sem fio. O uso da tecnologia Bluetooth não é permitido.

Podem ser usadas a visão global, onde a imagem é captada normalmente por uma ou mais câmeras fixadas sobre o campo à aproximadamente 3m, ou a visão local, onde cada robô possui uma câmera. O jogo é realizado sobre um carpete ou feltro verde retangular com 4,9m por 3,4m (fig.2). Ele deve possuir 300 mm de campo após as linhas laterais [7]. As exatas dimensões do campo estão descritas na figura a seguir:

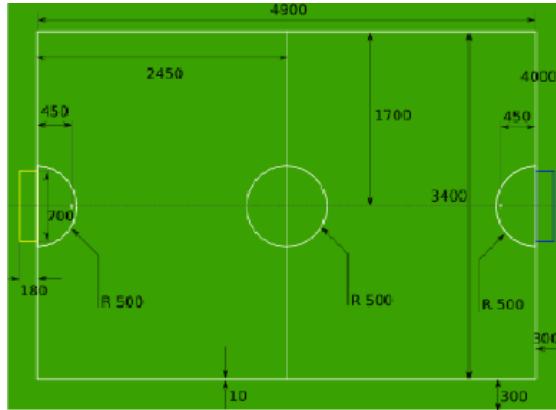


Figura 2: dimensões do campo [7]

A iluminação deve ser realizada de uma maneira uniforme com pelo menos 500 LUX. É utilizada a mesma bola da categoria *Very-Small*, uma bola de golfe laranja com aproximadamente 43 mm de diâmetro e pesando aproximadamente 46 g.

Para o seu dispositivo de drible, que é o que segura a bola junto ao robô durante seu deslocamento criando um giro contrário na bola, existem algumas restrições. Esse giro deve ser perpendicular ao plano do piso. A bola só pode entrar até certo ponto no robô, de modo que visto por cima, devemos ver pelo menos 80% de sua área projetada da bola.

3 O Projeto ROBOFEI

3.1 Estrutura do Projeto

Todo projeto mecânico deve ser planejado com muito cuidado antes de seu início. É melhor perder tempo planejando para evitar erros no projeto final. Esse é um tipo de projeto denominado iterativo, isto é, vamos adaptando dados e medidas durante os cálculos, recalculando sempre que necessário. Com isso precisamos de um bom planejamento para não nos pertermos durante os cálculos do projeto.

Para o nosso projeto utilizaremos o mínimo necessário que todo projeto mecânico deve ter em seu planejamento. Ele pode ser dividido em partes como veremos a seguir.

3.1.1 Especificação

Nosso robô será desenhado para ter uma aceleração de $2,8 \text{ m/s}^2$. Para isso colocamos duas condições para que isso ocorra. A primeira delas é o robô criar essa aceleração para o pior caso do movimento do robô, isto é, o ângulo de movimentação em que um determinado motor utiliza sua máxima capacidade. A segunda condição seria de nosso goleiro se movimentar de uma trave à outra em $1/3 \text{ s}$, tempo que times lá fora utilizam como referência [8].

Com as forças dos motores nos dois casos, calculamos a velocidade que cada roda deve ter para que o robô atinja a velocidade desejada de $2,8 \text{ m/s}$. Com a força e a velocidade calculamos a potência necessária nos motores para os dois casos e analisamos o pior caso, no qual utilizaremos para escolher os motores.

Para se calcular a aceleração, precisamos estimar o peso de nosso robô. Estamos estimando esse peso em torno de $2,8 \text{ kg}$, peso próximo a de times que utilizam a maior parte da estrutura em alumínio.

Para nosso dispositivo de drible estamos estudando a possibilidade de utilizar um cilindro de alumínio revestido com borracha que gira a bola contra o robô.

Para o dispositivo de chute já foi decidido utilizar um solenóide como dispositivo de acionamento. Comparado com outros dispositivos como ar comprimido ou molas, ele é o que ocupa menos espaço e possui uma menor manutenção. Na ponta do solenóide será presa uma barra que impulsionará a bola. A força do solenóide deverá ser necessária para vencer o atrito do sistema e impulsionar a bola a uma velocidade que dificulte a defesa pelo goleiro adversário. É interessante controlarmos essa velocidade para podermos realizar troca de passes entre os robôs durante os jogos.

A maior parte da estrutura será fabricada em alumínio para ao mesmo tempo ser resistente a possíveis impactos durante as partidas e também ser leve para reduzir a inércia do robô, aumentando sua aceleração. O alumínio é um material que atende a

esses requisitos com um custo relativamente baixo. Pela regra da categoria, não podemos ultrapassar os 180 mm de diâmetro e os 150 mm de altura. Ela também fala que a bola só pode ter 20 % de sua área projetada dentro do robô [7].

Suas rodas omnidirecionais serão fabricadas já que as comercialmente encontradas são rodas muito largas e de baixo coeficiente de atrito.

3.1.2 Coerência – Filosofia de Projeto

Antes de iniciar um projeto devemos observar alguns fatores antes. Sempre devemos pensar em qual aplicação o projeto será usado, seu tempo de vida útil desejado entre outros fatores. Para o nosso caso, temos que pensar se sua aplicação será somente para pesquisas ou para competição. Dependendo da escolha, o projeto seguirá um caminho diferente. Por exemplo, para a aplicação em pesquisas não precisamos nos preocupar em atingir velocidades e acelerações altas, utilizar micro motores ou nos preocuparíamos em suas dimensões máximas. Com isso o projeto se torna mais barato já que poderíamos utilizar motores menores e nacionais, baterias mais baratas, entre outras opções.

Essa etapa é importante para no final não observarmos que gastamos muito dinheiro nos motores, mas todo o resto do robô foi construído com peças baratas de baixa confiabilidade o que não teria sentido algum.

3.1.3 Comparação Crítica

Ninguém re-inventa a roda, somente aperfeiçoamos ela. É por isso que devemos observar projetos de outras faculdades observando as especificações e os dispositivos utilizados, tanto das que obtiveram sucesso como as que estão iniciando agora. Desse modo estudamos os erros cometidos e gastamos nosso tempo aperfeiçoando seus acertos.

Não devemos perder tempo errando em pontos que já poderíamos saber que dariam errados. Com base nisso foi feita uma ampla pesquisa sobre os robôs de outras

faculdades obtendo informações muito importantes e adquirindo conhecimento sobre o assunto.

3.1.4 Layout Básico

Antes de colocarmos todos os detalhes no papel devemos traçar um layout de cada peça que faz parte do robô. Isso ajuda muito, pois não perdemos tempo adaptando detalhes que serão ajustados nos desenhos finais.

3.1.5 Projeto

Essa parte se dá aos cálculos que deverão ser efetuados durante o projeto, os desenhos que serão feitos de cada peça utilizada, desenhos de montagem dos sistemas utilizados. Todos os cálculos devem ser feitos de maneira organizada e todos devem ser registrados para mais tarde ser feita a documentação do projeto. A documentação serve para que outra pessoa mais tarde consiga entender como foi realizado o projeto seguindo toda a documentação ou para encontrarmos erros cometidos que só observamos durante os testes finais.

3.1.6 Simulação / Testes

Para termos certeza de que o dimensionamento realizado nos cálculos foi correto, ou seja, se a quantidade de material utilizado está em excesso ou em uma quantidade menor do que deveria, podemos utilizar programas que fazem a análise de elementos finitos na peça desejada. Esse tipo de programa nos informa a distribuição de tensão na peça e seu respectivo valor, a deformação que a peça sofre com o esforço aplicado entre outras informações. Com essas informações conseguimos ver onde podemos retirar mais material de locais onde as tensões estão baixas, ou onde devemos acrescentar mais material para evitar eventuais quebras. Com isso podemos fazer ajustes antes de iniciarmos a construção de nosso protótipo, o que seria uma economia de tempo e dinheiro.

Após a construção do protótipo, devemos realizar testes estáticos como peso final, medidas finais, montagem, facilidade de manutenção e também realizar testes dinâmicos verificando se o projeto atende às especificações iniciais e caso não atenda descobrir a causa do problema.

3.2 Sistema Omnidirecional

O sistema omnidirecional do robô é o responsável pela sua locomoção. Ele dá ao robô uma movimentação com 3 graus de liberdade (o máximo possível em um plano), sendo que são 2 eixos horizontais e um de rotação. Ele merece muita atenção durante o projeto, podendo-se dizer que é o sistema mais importante do robô, já que sem ele o robô não se movimentaria. A sua principal característica é que o robô poderá acelerar em qualquer direção, agilizando sua movimentação o que durante o jogo é muito importante.

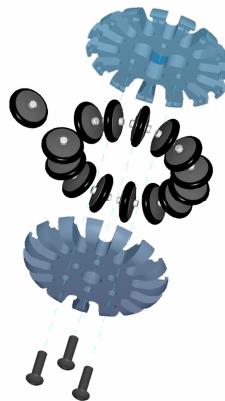


Figura 3: Vista explodida de uma roda Omnidirecional [9]

Seu principal componente é a roda (fig.3). Ela possui roletes em toda a sua volta fazendo com que ela possa escorregar na direção perpendicular ao eixo do motor, sem que ela tenha que se arrastar, o que geraria um grande atrito.

Esses roletes devem ser bem projetados para que eles não travem fazendo com que a roda se arraste pelo campo ou o atrito não seja suficiente com o campo e a roda

patine o que causaria uma perda de aceleração e controle do robô. Podemos utilizar anéis o-ring em cada rolete. Isso ajudará a aumentar o atrito do robô no campo sem danificá-lo. Está sendo estudada a possibilidade em utilizar eixos de aço polido para os roletes para que diminua o atrito de rotação do rolete. Colocaremos o maior número possível de roletes para que o robô possa ter um movimento mais suave, sem muitos trancos, mas temos que estudar isso junto com a limitação que teremos da usinagem a qual tentaremos realizar dentro da própria faculdade para se reduzir os custos do protótipo.

Nós fabricaremos as nossas próprias rodas, pois as que são vendidas atualmente são muito largas e gostaríamos de reduzir ao máximo o espaço interno de nosso robô. Para isso usaremos o tipo de roda mais usado por outros times que fabricam suas próprias rodas (fig. 3). A roda é dividida no meio, onde são montados os roletes e posteriormente a outra metade se encaixa, sendo fixada através de parafusos contra a outra metade.

Devemos prever também no projeto dessa roda um rolamento de esferas que será fixado internamente da roda pra reduzir ao máximo o atrito do eixo com as rodas do motor, reduzindo a perda de potência por atrito. O rolamento também ajudará a manter um bom alinhamento da rodas em relação ao eixo.

3.3 Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão usado será construído inteiramente por nós. Isso porque as caixas de redução comercializadas são muito longas, e como vamos utilizar encoders acoplados nos motores não haveria espaço interno para todos os motores. Com isso vamos comprar engrenagens de plástico ou de metal que são comercializadas, e vamos adaptá-las ao nosso sistema. As engrenagens de plástico são mais baratas, mais leves e mais fáceis de se encontrar, mas emitem mais ruído do que as engrenagens de metal além de sofrerem um desgaste maior.

Ele basicamente possuirá uma engrenagem menor (pinhão) que será acoplada ao motor através de um parafuso (trava-eixo) ou por interferência. Esta estará



engrenada com uma outra engrenagem maior (coroa) fixada à roda omnidirecional. A relação entre o tamanho dessas engrenagens é chamada de relação de transmissão.

A relação entre o número de dentes e o diâmetro da engrenagem é chamada de módulo. Para que haja engrenamento entre duas engrenagens elas deverão possuir o mesmo módulo [10]. Sendo assim, podemos calcular a relação de transmissão de três maneiras:

$$i = \frac{w_1}{w_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1}$$

Onde **w** é a velocidade angular, **d** o diâmetro e **z** o número de dentes da engrenagem. O índice **1** se refere ao pinhão e o índice **2** à coroa.

Outra relação que podemos tirar de uma redução é da velocidade e do torque com a relação de transmissão.

$$T_{saída} = T_{entrada} \times i$$

$$n_{saída} = \frac{n_{entrada}}{i}$$

A potência que sai do motor é a mesma que chega à roda, retirando-se apenas as perdas mecânicas do sistema, cuja grande maioria é gerada pelo atrito. A relação de transmissão será calculada posteriormente, pois depende da velocidade final desejada e do motor que será escolhido.

3.4 Motores

Os motores de corrente contínua possuem constantes eletromecânicas. Uma delas é a constante de velocidade “**kn**” que nos fala em qual velocidade o rotor irá trabalhar dependendo da voltagem aplicada, e a outra é a constante de torque “**km**” que nos mostra qual corrente que passa pelo motor dependendo do torque aplicado [11].

Eles possuem um diagrama de velocidade-torque que mostra o comportamento mecânico do motor a uma constante voltagem aplicada. Esse diagrama não considera a influência da temperatura e das tolerâncias, mas para uma primeira estimativa é o suficiente. A velocidade cai linearmente quando o torque é aumentado. A curva é facilmente desenhada com dois pontos que são fornecidos pelos fabricantes: a velocidade sem carga aplicada (no-load speed) e o torque em que o rotor trava (stall torque). Esses pontos fornecidos normalmente são relacionados à voltagem nominal do motor, mudando-se essa voltagem, mudam-se esses pontos, mas a nova reta continua paralela à reta de voltagem nominal. A figura abaixo nos mostra isso.

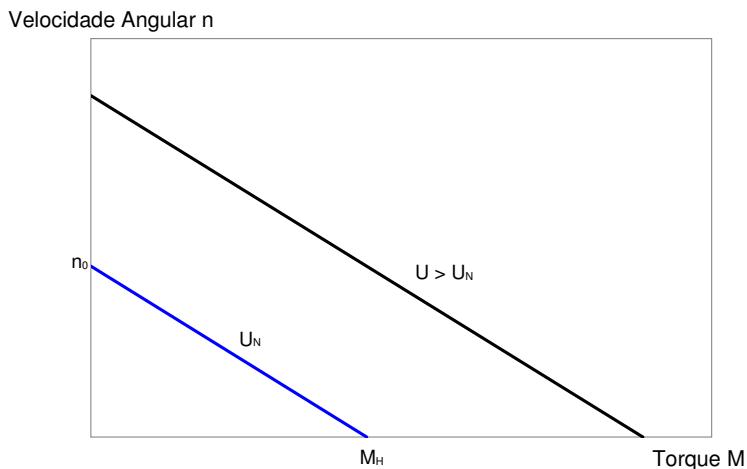


Figura 4: Gráfico da relação do torque com a rotação do motor [11]

Teoricamente os motores de corrente contínua podem ser operados a qualquer voltagem, mas devem-se respeitar os limites do motor, como a rotação máxima do rotor e a corrente máxima aplicada cujos dados também são fornecidos pelos fabricantes. Existe uma rotação máxima, pois em altas rotações as escovas se desgastam mais rapidamente, e devido ao desbalanceamento do rotor em altas rotações aumenta-se a vibração, reduzindo a vida dos rolamentos. Há também o limite de corrente continuamente aplicada, pois devido ao calor gerado, existe um limite para que esse calor seja dissipado, não sobre aquecendo o rotor.

Esses limites fornecidos são para operações contínuas, para que não seja reduzida bruscamente a vida do motor, mas para tempos curtos, podemos utilizar uma corrente e velocidades maiores, tomando cuidado para não ultrapassar a temperatura máxima permitida no rotor.

3.5 Seleção dos Motores do Sistema Omnidirecional

Uma das coisas mais importantes para esse projeto é a correta seleção dos motores que transmitem potência às rodas. O motor deve atender os requisitos mínimos desejados para o robô, como sua aceleração e velocidade final, sem que o mesmo queime por excesso de corrente ou que haja alguma falha mecânica em seu rotor e rolamentos devido ao abuso de carga exercido sobre eles. É muito importante que ele também não ocupe muito espaço interno para não atrapalhar outros componentes.

Como a equipe RoboFEI está começando agora nessa categoria, nós não possuímos dados próprios anteriores sobre aceleração, peso e velocidade final para que possamos aprimorá-los. Com isso foi realizada uma grande pesquisa sobre dados de outras equipes para que possamos começar tendo um robô competitivo.

Com base nessa pesquisa, nós criamos a meta de construir um robô com uma aceleração de $2,8 \text{ m/s}^2$ e com uma velocidade final de $2,8 \text{ m/s}$. Com esses dados podemos calcular a força e velocidade de cada motor através das seguintes matrizes [8].

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ R.aw \end{pmatrix} = \frac{1}{m} \times \begin{pmatrix} -\cos\theta_1 & -\cos\theta_2 & \dots & -\cos\theta_n \\ -\sin\theta_1 & -\sin\theta_2 & \dots & -\sin\theta_n \\ \frac{1}{\alpha} & \frac{1}{\alpha} & \dots & \frac{1}{\alpha} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix}$$

Com essa matriz e o peso do robô colocamos os valores dos vetores de aceleração no eixo x e y e da aceleração angular e ela nos retorna o valor das forças que cada motor deve exercer.

Para a velocidade angular o procedimento é parecido:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & \frac{1}{n} \\ -\cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & \frac{1}{n} \\ \dots & \dots & \dots \\ -\cos \theta_n & -\sin \theta_n & \frac{1}{n} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{pmatrix}$$

Colocando os valores dos vetores da velocidade desejada no robô (eixo x, y e velocidade angular) ela nos retorna o valor da velocidade que cada motor deve ter.

Com base nesses dados podemos calcular o torque necessário na roda e sua respectiva rotação.

$$T = F \times r$$

$$n = \frac{v \times 60}{2\pi r}$$

A potência necessária pode ser calculada para a escolha dos motores. Escolhemos com base no pior caso, isto é, a maior potência calculada. Para segurança multiplicamos seu valor por 1,3 já que o motor elétrico não possui um rendimento de 100% e também possuímos perdas mecânicas na transmissão.

$$P = w \times T = 2\pi \times n \times T$$

Com esse dado podemos ir em busca de um motor que atenda esses requisitos através de catálogos de fabricantes de motores DC. Como usaremos o sistema de PWM para o controle de velocidade do motor usaremos motores com escovas (brushed) que são mais fáceis de se controlar.

Separando alguns motores que estejam próximos a essa potência desejada pegamos as especificações de cada motor para efetuar alguns cálculos. O primeiro cálculo a ser efetuado seria encontrar o torque máximo que cada motor pode gerar.

Isso pode ser obtido multiplicando-se a constante de torque K_m pela máxima corrente que pode ser aplicada no motor. Essa máxima corrente está nos catálogos e como é uma corrente máxima para operações contínuas, podemos ultrapassá-la um pouco já que o robô não estará acelerando com toda sua força 100% do tempo. Com isso aumentamos 30% do valor da corrente limite **I_{max}** para serem efetuados os cálculos. O torque máximo pode ser obtido da seguinte forma:

$$T_{\max} = K_m \times I_{\max}$$

Com o valor do torque máximo e do torque necessário nas rodas do robô, podemos calcular a relação de transmissão necessária entre o motor e a roda.

$$i = \frac{T_{necessario}}{T_{\max}}$$

Precisamos padronizar esse valor com valores que são encontrados comercialmente. Com o valor padronizado do i recalculamos o torque que o motor sofrerá.

$$T_{\max} = \frac{T_{necessario}}{i}$$

Agora podemos calcular a corrente que passará pelo motor quando esse torque for aplicado.

$$I_m = \left(\frac{T_{\max}}{k_m} \right) + I_0$$

Onde I_0 é a corrente do motor quando o mesmo não possui carga aplicada em seu eixo.

Precisamos calcular qual será a voltagem necessária que o motor deverá ter para que as rodas girem na rotação desejada. Primeiro precisamos calcular a rotação necessária no motor usando a relação de transmissão padronizada.

$$n_{motor} = n \times i$$

Agora podemos calcular a rotação que o motor deve ter se não tivesse carga nenhuma aplicada ao seu eixo. Podemos fazer isso com a seguinte equação:

$$n_0 = n + 1350 \left(\frac{I_m \cdot R}{k_m} \right)$$

Com o valor de n_0 desejado conseguimos calcular a voltagem necessária para o motor girar na rotação desejada com o torque necessário aplicado em seu eixo, onde n_{0n} é a rotação sem carga com a voltagem nominal aplicada:

$$U = \frac{n_{0n} \times U_n}{n_0}$$

Agora comparamos a voltagem calculada com a nominal do motor. Se a voltagem calculada for menor que a nominal, podemos aumentar a relação de transmissão para aumentar o giro necessário no motor. Com isso aumentamos o controle de nosso robô em baixas velocidades, já que para ele andar certa distância seu motor terá que girar mais vezes do que antes, gerando mais sinais para o controle.

3.6 Design do Sistema de Transmissão

Depois de escolhida a relação de transmissão, devemos escolher as engrenagens que atendam a essa necessidade. Devemos procurar o menor pinhão possível, para que a dimensão do sistema final não fique muito grande, ocupando muito espaço ou até mesmo não sendo possível sua montagem. O pinhão será preso por interferência junto ao eixo do motor. Como a engrenagem é feita de plástico, será usinado um anel de alumínio com um pequeno furo rosulado para se alojar um parafuso que será apertado contra o eixo do motor. Escolhido o pinhão, com seu número de dentes e seu módulo, devemos calcular o número de dentes necessário para a coroa que terá o mesmo módulo do pinhão.

O módulo é a relação entre o número de dentes e o diâmetro da engrenagem. Há uma diferença entre o módulo do sistema internacional e do sistema britânico (onde é chamado de Diametral Pitch), mas somente na forma de calcular e no número final obtido, pois a teoria de que para haver engrenamento as duas engrenagens devem possuir o mesmo módulo, é a mesma nos dois casos.

$$m = \frac{d}{z} \text{ (SI)} \quad D_p = \frac{z}{d} \text{ (SB)}$$

Para a coroa, escolhemos uma engrenagem sem cubo de roda, pois ela será parafusada contra a própria roda, através de 3 parafusos em um ângulo de 120° um em relação ao outro. Com a relação de transmissão calculada anteriormente calculamos o número de dentes da coroa da seguinte forma:

$$N_c = N_p \times i$$

Com as dimensões da coroa e do pinhão podemos calcular a distância entre os eixos.

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Como já dito anteriormente, a coroa será fixada na roda do robô. Para que não haja risco de que o pinhão encoste-se à roda colocamos um anel separador entre a roda e a coroa. Fixamos as duas metades da roda, com o rolamento interno encaixado dentro dela, com o separador e a coroa como mostra a figura a seguir:

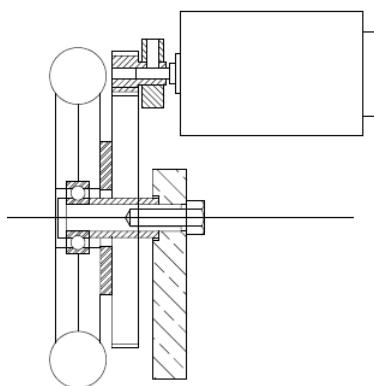


Figura 5: Desenho preliminar do nosso sistema de transmissão

Com isso podemos desenhar o eixo que será utilizado no qual será apoiada a roda. Ele será um eixo de aço que possuirá um ressalto na cabeça para apoiar no anel interno do rolamento e na outra ponta um furo concêntrico ao eixo com rosca para ser fixado um parafuso que fixará o sistema à base. Uma bucha será necessária para que haja o aperto do anel interior do rolamento com a cabeça do eixo, mantendo a roda alinhada perpendicularmente ao eixo.

Nesse projeto, a escolha do rolamento se deve a uma única característica que foi a dimensional, mas para uma escolha mais precisa em outros sistemas devem-se analisar muitos outros fatores como o tipo de rolamento, a carga aplicada, o tipo de carga, sua direção, a vida útil desejada para o rolamento, entre outras características. Nesse projeto só levamos em conta o dimensional, pois a carga aplicada neles é mínima, e o tempo de operação dos robôs é mínimo também, sendo assim para esse nosso projeto nós desconsideramos esses fatores.

3.7 Escolha do número de rodas

Existe uma grande dúvida entre usar três ou quatro rodas. O uso de três rodas deixa mais espaço para outros componentes e também faz com que o robô tenha mais aderência das rodas com o piso já que o peso é distribuído em três rodas. Mas a sua aceleração é mais desigual. Existem pontos que ele acelera muito mais que outros. Apesar de ela ser maior que em outras direções que o robô com 4 rodas, o robô possui um controle melhor com 4 rodas já que sua aceleração é mais uniforme. Conforme um estudo realizado pela Cornell University [12], eles simularam no programa MATLAB um gráfico mostrando a diferença de aceleração entre três e quatro rodas de acordo com a direção desejada.

Azul: Sistema Omnidirecional de 4 rodas perfeito
Vermelho: Sistema Omnidirecional de 3 rodas perfeito

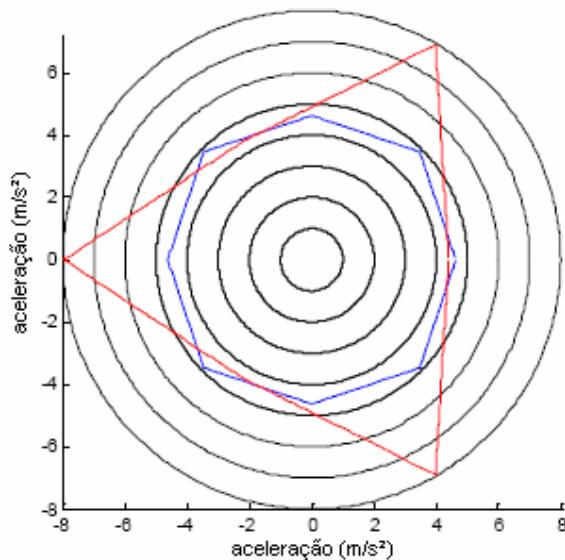


Figura 6: Gráfico da diferença da aceleração entre um robô com 4 e outro com 3 rodas

3.8 Sistema de Chute

O sistema de chute do robô é outra parte muito importante do projeto. Ele dá ao robô a capacidade de fazer o gol sem que ele tenha que entrar dentro da área empurrando a bola, podendo-se chutar a bola de longe, surpreendendo o goleiro.

Um bom sistema de chute deve possuir uma boa precisão, e aplicar uma grande velocidade na bola. Para aumentar a precisão devemos aumentar a rigidez da barra de chute, diminuindo a sua deformação. Para aumentar a rigidez devemos aumentar a área da barra, ou mudar o seu material. Colocar suportes que evitem a torção no momento do chute, aumenta bastante a precisão.

Colocar o solenóide em linha com a barra de chute faz com que diminua a flexão de material na hora do chute, onde se perderia energia deformando o material, com isso é muito importante que o solenóide esteja alinhado com a barra.

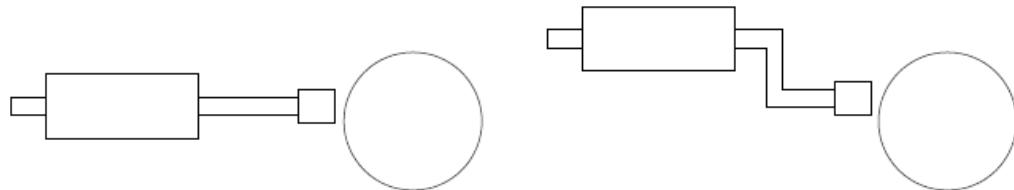


Figura 7: Solenóide alinhado com a barra (esq.) e o uso de uma coluna que causa o desalinhamento

Para se aumentar a velocidade do chute, deve-se evitar o choque com a bola. Deve-se empurrá-la o maior tempo possível, acelerando-a ao máximo. Considerando-se que a energia transmitida à bola não será gerada por choque, e que a bola será empurrada, podemos calcular a energia cinética que será transmitida à bola pela equação:

$$W = F \times d$$

Onde:

$$F = m \times a$$

Com isso podemos ver que para aumentar a aceleração, temos duas opções. Podemos reduzir a massa móvel do sistema de chute, ou podemos aumentar a força que é gerada pelo solenóide. Trabalhando com uma dessas opções ou até com as duas, aumentamos a aceleração, e com isso a velocidade da bola. Uma opção é o uso de capacitores para se armazenar energia que será descarregada na hora do chute. A grande vantagem disso é que não precisaremos de baterias extras, o que aumentaria muito o peso de nosso robô.

Um ponto importante é onde a barra encosta-se à bola. A bola pode se movimentar de dois modos no campo. Ela pode se deslocar escorregando ou rolando sobre o campo. Quando ela escorrega, ela perde energia pelo atrito gerado pelo campo sobre a bola. Por isso um movimento em que se perderia menos energia cinética seria o de rolagem sobre o campo.

3.8.1 Problema de Flexão na Barra

Para conseguirmos aumentar a precisão de nosso chute, precisamos reduzir a flexão que a barra sofre. Para isso devemos primeiramente analisar o modelo dimensional a ser usado. Isso é muito importante, pois um modelo mal escolhido dificulta a resolução desse problema.

Dois modelos simples em que se facilitaria a construção e onde sobraria mais espaço interno, seriam os das figuras abaixo.

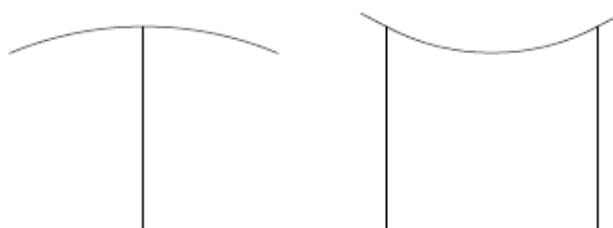


Figura 8: Barra com flexão negativa (esq.) e barra com flexão positiva (dir.)

Mas eles têm grande problema de flexão. No primeiro gera-se uma flexão negativa. Quando a bola for atingida pela ponta da barra, ela torce para trás fazendo com que a bola saia do centro. No segundo quando a bola atinge o centro da barra, a barra sofre uma flexão positiva. Uma boa solução seria apoiar a barra em 3 apoios. Dois nas pontas para evitar essa flexão negativa e um no centro para evitar a flexão positiva. Isso teoricamente deixaria a barra mais rígida, mas temos de pensar no espaço necessário para esse sistema. Para o material temos duas opções viáveis, o uso de alumínio, de plástico, ou uma opção que deve ser estudada é o uso da combinação dos dois materiais. O plástico é um material mais leve que o alumínio, mas em compensação ele possui um módulo de elasticidade menor, isto é, ele é menos rígido que o alumínio.

3.9 Sistema de Drible

O sistema de drible do robô é o responsável por manter a bola junto ao robô, facilitando o chute ao gol, ou para roubar a bola de outro robô. Com ele podemos criar estratégias que ajudariam muito na hora do chute ao gol como, por exemplo, sair rapidamente da frente de um robô adversário que está na direção do gol sem perder o controle da bola. Ele é constituído por um motor, uma transmissão e um cilindro revestido na maioria das vezes por algum tipo de borracha para aumentar a aderência do cilindro com a bola. Seu funcionamento se baseia em girar a bola criando-se uma força que empurra a bola contra o robô.

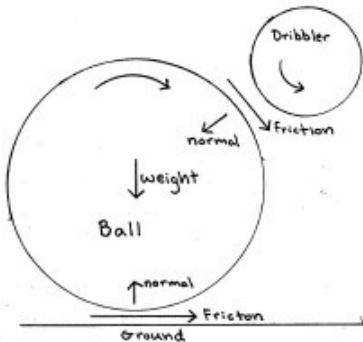


Figura 9: Dinâmica do sistema de Drible [13]

O motor deve ser dimensionado para conseguir vencer essa força que é a de atrito dinâmico que a bola faz com o campo. A transmissão de potência dos motores para o cilindro pode ser feita por correias ou por engrenagens. A transmissão realizada por correias possui um rendimento mecânico menor e ocupa um espaço maior do que a transmissão feita por engrenagens, com isso escolhemos a transmissão por engrenagens de plástico ou de metal.

Bolas em uma alta velocidade podem ser difíceis de serem pegas pelo sistema, pois o sistema sendo rígido, a bola bate no cilindro e se afasta já que possui muita energia devido a sua velocidade. Para resolver esse problema pode ser usada uma suspensão no sistema de drible a qual amorteceria a energia da bola facilitando o seu domínio. Uma outra opção é utilizar a estratégia para no momento anterior em que receber a bola, o robô se movimente para trás, amortecendo um pouco a velocidade.

Devemos dimensionar a altura que o cilindro irá encostar-se à bola, o seu diâmetro, e o seu comprimento. Quanto maior for o comprimento mais facilmente o robô irá pegar a bola, mas ele irá depender do ângulo e do diâmetro que as rodas da frente terão. Portanto vemos que o projeto do sistema de drible depende do término do projeto do sistema omnidirecional.

3.10 Projeto de Eixos

Eixos são usados na maioria das máquinas que conhecemos. Eles são utilizados para transmitir movimentos de rotação e torque de um lugar para o outro. Isso pode ocorrer de partes da máquina que necessitem desse tipo de movimento. Esse movimento pode ser transmitido de eixo para eixo através de engrenagens, correias, acoplamentos entre outros [14]. Eles podem ser montados em mancais (bi-apoiado), em balanço ou saliente.

As principais cargas aplicadas a eixos são a torção devido ao torque que eles transmitem e a flexão devido a forças transversais que engrenagens, polias ou outros componentes. Esses carregamentos podem ser constantes, ou cargas dinâmicas

cuja combinação de cargas varia com o tempo. Eixos rotativos mesmo quando solicitados por cargas fixas, devem ser projetados contra falhas de fadiga já que a cada volta partes do eixo alternam suas cargas entre tração e compressão.

Devido as necessidades do projeto, o eixo pode possuir diferentes dimensões ao longo de seu comprimento. Seu diâmetro pode variar, pode possuir entalhes para a fixação de anéis elásticos, furos para cavilhas ou pinos cônicos, entalhes de chaveta entre outros. Essas modificações geram concentrações de tensão no eixo que devem ser muito bem estudadas para posteriormente não criarem falhas em nosso eixo.

A fim de diminuir as deflexões de um eixo, o material mais utilizado para a fabricação de eixos é o aço já que seu modulo de elasticidade é bastante elevado. O bronze ou o aço inoxidável podem ser usados em ambientes onde a corrosão é uma preocupação. A potencia que um eixo transmite pode ser calculada pela seguinte formula:

$$P = T \cdot \omega$$

Onde T é o torque que o eixo esta transmitindo e w é a rotação que ele se encontra. Abaixo seguem algumas regras gerais para dimensionamento de eixo:

- Para minimizar as tensões e deflexões, o comprimento do eixo deve ser mantido o menor possível e os trechos onde o eixo se encontra em balanço reduzidos
- Uma viga em balanço terá uma deflexão maior que uma viga bi-apoiada para o mesmo comprimento de eixo.
- Um eixo vazado tem uma melhor razão rigidez / massa e freqüências naturais mais altas, mas em contrapartida, ele será mais caro e com um diâmetro maior
- Concentradores de tensão devem ser afastados de regiões com grandes momentos fletores.

- Se forem usados rolamentos não-auto-alinhantes, a inclinação do eixo nos mancais não deve ultrapassar 0,04 graus.
- Cargas axiais devem ser descarregadas em um único mancal. A adição de mais de um mancal pode sobrecarregar os mancais quando o eixo expandir termicamente.

3.11 Ajuste por Interferência

Em alguns casos em que precisamos acoplar um cubo a um eixo, podemos não ter espaço suficiente para utilizarmos chavetas ou estriais. Para isso podemos realizar uma união por interferência, também chamada de ajuste de pressão ou de encolhimento [14].

Ele pode ser obtido fazendo-se um furo no cubo com um diâmetro ligeiramente menor do que o do eixo. As duas partes são juntas lentamente por uma prensa, podendo-se utilizar óleo lubrificante aplicado na junta. Essa diferença de diâmetros causa grandes forças normais e de atrito entre as partes que é quem transmite o torque do eixo para o cubo ou vice versa. Ela também resiste a movimentos axiais do cubo em relação ao eixo.

Para reduzir a força necessária na montagem, podemos esquentar o cubo, expandindo seu diâmetro interno ou podemos resfriar o eixo para que seu diâmetro externo se contraia. Podemos utilizar as duas técnicas e quando as peças entrarem em um equilíbrio térmico, suas variações dimensionais vão criar a interferência.

O eixo tem um estado de tensões de uma pressão uniforme externa em sua superfície e o cubo de um cilindro de paredes grossas sujeito a uma pressão interna. A equação para se descobrir à pressão criada pelo ajuste pode ser obtida através da seguinte equação:

$$p = \frac{0,5 \times \delta}{\frac{r}{E_0} \left(\frac{r_0^2 + r^2}{r_0^2 - r^2} + \nu_0 \right) + \frac{r}{E_i} \left(\frac{r^2 + r_i^2}{r^2 - r_i^2} - \nu_i \right)}$$

Onde:

$$\delta = 2 \times \Delta r \text{ (diferença diametral total entre as duas peças)}$$

r_i = raio interno (se houver) de um eixo vazado

r_0 = raio externo do cubo

ν = Coeficiente de Poisson

E = Módulo de elasticidade

Para descobrirmos qual o torque que pode ser transmitido por essa interferência podemos utilizar a seguinte formula:

$$T = 2\pi r^2 \mu p l$$

Onde:

r = Raio do eixo

l = Comprimento do cubo

μ = Coeficiente de atrito entre o eixo e o cubo. $0,15 \leq \mu \leq 0,20$ (para ajuste por encolhimento ou pressão)

Para encontrarmos as tensões em cada peça devemos utilizar para o eixo:

$$\sigma_{teixo} = -p \frac{r^2 + r_i^2}{r^2 - r_i^2} \text{ (tangencial)}$$

$$\sigma_{reixo} = -p \text{ (radial)}$$

E para o cubo:

$$\sigma_{tcubo} = p \frac{r_0^2 + r^2}{r_0^2 - r^2} \text{ (tangencial)}$$

$$\sigma_{rcubo} = -p \text{ (radial)}$$

Devemos manter essas tensões abaixo das resistências de escoamento dos materiais. Caso aconteça escoamento, as dimensões irão mudar, podendo o sistema não conseguir transmitir o torque necessário ou até mesmo o cubo se soltar do eixo.

Em ajustes por interferência aparecem concentrações de tensão tanto no eixo como no cubo.

4 Resultados

4.1 Escolha dos Motores

Os cálculos a seguir mostram as etapas que foram seguidas para a escolha de nossos motores, para uma aceleração no eixo x e no eixo y tomando o pior caso.

Cálculo da força dos motores para uma aceleração de 2,8 m/s² na direção do eixo y:

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ R.aw \end{pmatrix} = \frac{1}{m} \times \begin{pmatrix} -\cos \theta_1 & -\cos \theta_2 & \dots & -\cos \theta_n \\ -\sin \theta_1 & -\sin \theta_2 & \dots & -\sin \theta_n \\ \frac{1}{\alpha} & \frac{1}{\alpha} & \dots & \frac{1}{\alpha} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 2,8 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2,8} \times \begin{pmatrix} -\cos 57^\circ & -\cos 135^\circ & -\cos 225^\circ & -\cos 303^\circ \\ -\sin 57^\circ & -\sin 135^\circ & -\sin 225^\circ & -\sin 303^\circ \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \\ f4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \\ f4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2,7320 \\ -2,3034 \\ 2,3034 \\ 2,7320 \end{pmatrix} [\text{N}]$$

Cálculo da força dos motores para uma aceleração de 2,8 m/s² na direção do eixo x:

$$\begin{pmatrix} 2,8 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2,8} \times \begin{pmatrix} -\cos 57^\circ & -\cos 135^\circ & -\cos 225^\circ & -\cos 303^\circ \\ -\sin 57^\circ & -\sin 135^\circ & -\sin 225^\circ & -\sin 303^\circ \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \\ f4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \\ f4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3,13 \\ 3,13 \\ 3,13 \\ -3,13 \end{pmatrix} [\mathbf{N}]$$

Usamos o maior valor da força para calcular a potencia do motor:

$$|F| = 3,13 \text{ N}$$

Agora calculamos a velocidade angular na direção do eixo x:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & \frac{1}{n} \\ -\cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & \frac{1}{n} \\ \dots & \dots & \dots \\ -\cos \theta_n & -\sin \theta_n & \frac{1}{n} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos 57^\circ & -\sin 57^\circ & \frac{1}{4} \\ -\cos 135^\circ & -\sin 135^\circ & \frac{1}{4} \\ -\cos 225^\circ & -\sin 225^\circ & \frac{1}{4} \\ -\cos 303^\circ & -\sin 303^\circ & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2,8 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1,52 \\ 1,98 \\ 1,98 \\ -1,52 \end{pmatrix} [\text{m/s}]$$

Agora calculamos o valor do torque necessário na roda do robô:

$$T = F \times r$$

$$T = 3,13 \times 0,0275$$

$$T = 0,086 \text{ Nm}$$

Calculando a rotação necessária na roda:

$$n = \frac{v \times 60}{2\pi r} = \frac{1,98 \times 60}{2\pi r} = 688 \text{ rpm}$$

Agora podemos calcular a potencia necessária:

$$P = \omega \times T = 2\pi \times n \times T$$

$$P = 6,20W$$

Agora devemos adotar uma segurança de 30% pelo rendimento do motor elétrico e perdas mecânicas da transmissão.

$$P = 8,1W$$

Procurando no catálogo da Faulhaber [15] encontramos um motor que atende aos nossos requisitos. O motor **2232 006 SR** que funciona com 6 V nominais e possui uma potência de 11W. Com os dados do motor podemos fazer os cálculos restantes para confirmar a escolha e escolher a relação de transmissão. Vamos calcular o torque máximo que o motor pode gerar, colocando-se os 30% a mais que podemos ultrapassar da corrente máxima, já que não será uma operação contínua:

$$T_{\max}' = K_m \cdot I_{\max} \cdot 1,3 = 8,03 \times 1,87 \times 1,3 = 19,52 \text{ mNm}$$

Agora calculamos a relação de transmissão teórica:

$$i' = \frac{T_{\text{necessario}}}{T_{\max}} = \frac{0,086 \times 1000}{19,52} = 4,42$$

Padronizando a relação de transmissão, podemos calcular o torque máximo que o motor possuirá:

$$T_{\max} = \frac{0,086 \times 1000}{5} = 17,27 \text{ mNm}$$

Agora calculamos a corrente que passará pelo motor:

$$I_m = \left(\frac{T_{\max}}{k_m} \right) + I_0 = \left(\frac{17,27}{8,03} \right) + 0,035 = 2,19A$$

Calculamos agora a rotação necessária no motor pela relação de transmissão:

$$n_{motor} = n \times i = 688 \times 5 = 3438 \text{ rpm}$$

Agora calculamos a rotação n_0 :

$$n_0 = n + 1350 \left(\frac{I_m \cdot R}{k_m} \right) = 3438 + 1350 \left(\frac{2,19 \times 0,81}{8,03} \right) = 3735 \text{ rpm}$$

Com essa rotação podemos calcular a voltagem necessária para o motor girar na rotação desejada com o torque necessário aplicado em seu eixo:

$$U = \frac{n_{0n} \times U_n}{n_0} = \frac{7100 \times 6,0}{3735} = 3,2V$$

Como o valor é abaixo da voltagem nominal do motor podemos aumentar a relação de transmissão para aumentar o giro do motor e aumentar a voltagem necessária. Isso ajuda no controle do robô também, já que o motor gira mais vezes, aumentando-se os pulsos do encoder. Após tentativas e limitações de montagem, chegamos ao valor de **i = 6**. Recalculando todos os valores temos o seguinte resumo:

$$T_{\max} = 14,39 \text{ mNm}$$

$$I_m = 1,83A$$

$$n = 4125 \text{ rpm}$$

$$U = 3,7V$$

Com isso confirmamos nossa escolha do motor, com uma boa margem de segurança para evitar que o motor superaqueça, e com uma boa aceleração e velocidade para o nosso robô.

4.2 Cálculo do motor do drible

Para o cálculo do motor do drible, utilizamos um processo parecido ao anterior. A única diferença é no modo em como calcular a potência que o motor precisa gerar. Precisamos calcular a força necessária para escorregar a bola sobre o campo. Observando o desenho abaixo podemos ver como se distribuem as forças no sistema e com isso calcular a força necessária no cilindro.

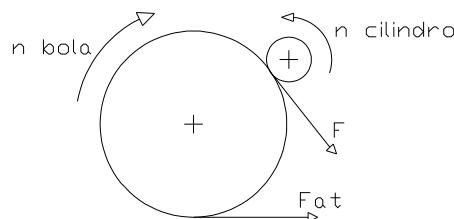


Figura 10: Dinâmica do sistema de drible.

A força “F” tem que vencer a força de atrito “Fat” para que a bola comece a escorregar, mas além de nosso sistema ter que vencer essa força, ele precisa vencer a força do cilindro do adversário que estará brigando pela posse da bola.

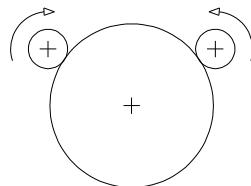


Figura 11: Dois sistemas de chute brigando pela bola.

Com isso precisamos dos valores que os outros times usam, ou qual motor eles utilizam para que nosso sistema de drible possa ser competitivo. O time da universidade Cornell de Nova York utiliza o motor 118713 da Maxon [12] que possui 4,5W.

Por limitações de tamanho escolhemos o motor **1724 006 SR** da Faulhaber que possui uma potência de 2,58W. Apesar de ser uma potência menor do que do motor da Cornell, muitas das outras equipes usam um motor bem menor que os deles. Com isso usaremos mesmo esse motor e continuamos com nossa pesquisa atrás desses dados das outras equipes.

Agora que possuímos um motor, devemos escolher a relação de transmissão para chegar à rotação desejada. Como desejamos que a bola gire à 1200rpm. Como a bola possui 43 mm e nosso cilindro possuirá 12 mm temos uma relação de transmissão entre eles de 3,6.

Então para que a bola gire à 1200rpm precisamos que o cilindro gire à 4300rpm. Agora calculamos o torque máximo da mesma forma que no sistema omnidirecional:

$$T_{\max} = K_m \cdot I_{\max} = 6,59 \times 0,76 = 5,01 \text{ mNm}$$

Calculamos a relação de transmissão considerando que a rotação do motor cairá 10% quando for aplicado o torque. Mais tarde esse valor será recalculado se necessário.

$$i = \frac{n_0}{n_{nec} \times 1,1} = \frac{8600}{4300 \times 1,1} = 1,82$$

Padronizamos com $i = 1,8$

Agora calculamos a corrente média que passa pelo motor quando for aplicado o torque máximo que ele pode fornecer (5,01mNm):

$$I_m = \frac{T_{\max}}{K_m} + I_0 = \frac{5,01}{6,59} + 0,02 = 0,78 \text{ A}$$

Calculando a rotação que o motor deve ter com a relação de transmissão padronizada:

$$n_{mot} = n_{nec.} \times i = 4300 \times 1,8 = 7740 \text{ rpm}$$

Podemos calcular a rotação que o motor deveria ter sem carga aplicada:

$$n_0 = n + 1350 \left(\frac{I_m \cdot R}{k_m} \right) = 7740 + 1350 \left(\frac{0,78 \times 3,4}{6,59} \right) = 8285 \text{ rpm}$$

E com isso, calcular a tensão de alimentação do motor:

$$U = \frac{n_{0n} \times U_n}{n_0} = \frac{8600 \times 6,0}{8285} = 3,2V$$

Como o valor da tensão está próximo da tensão nominal do motor, não há necessidade de modificar o valor da relação de transmissão.

4.3 Sistema de Chute

O sistema de chute é constituído basicamente por duas partes, o solenóide que é o responsável pela energia que será transferida para a bola, e a barra de chute que é a peça que adapta o movimento do eixo do solenóide para transferi-lo para a bola.

4.3.1 Solenóide

Escolhemos o solenóide modelo 030 série D da Soletec [16] para o nosso sistema de chute. Ele possui uma carcaça que já vem com roscas M4 para fixação. Usaremos uma mola em seu eixo para o retorno, que será apoiada em uma arruela parafusada na base do próprio eixo (fig.12).

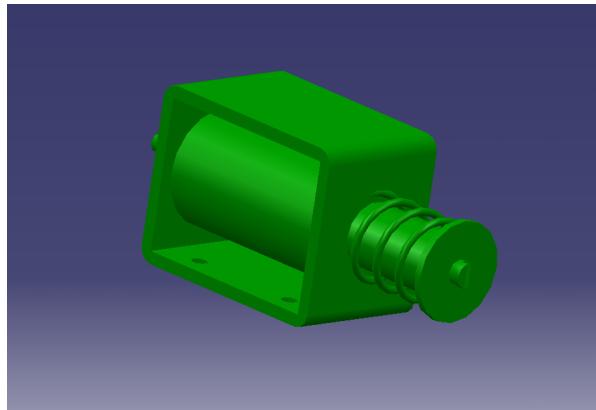


Figura 12: Montagem do Solenóide com a mola de retorno.

Para a mola, precisamos de uma mola com um coeficiente de rigidez “k” o mais baixo possível para não desperdiçarmos a energia do solenóide para deformar a mola. Ela só precisa retornar a barra de chute à sua posição inicial.

4.3.2 Barra de Chute

Ela foi projetada para ser o mais leve possível aumentando-se assim a aceleração e reduzindo a energia perdida do sistema. Seu projeto levou em conta também uma deformação mínima, isto é, ela tem que ser rígida o suficiente para não deformar durante o chute já que essa deformação seria uma perda de energia.

Fizemos uma simulação de elementos finitos somente para analisar onde temos concentração de tensões (fig. 13). Como estamos pensando no futuro em fazer essa barra em plástico, ou resina, esta simulação ajudará nos futuros projetos para termos cuidado para não trincar o plástico em regiões com concentração de tensão.

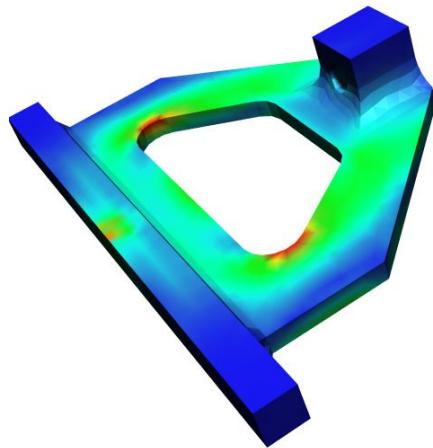


Figura 13: Simulação da concentração de tensões na barra.

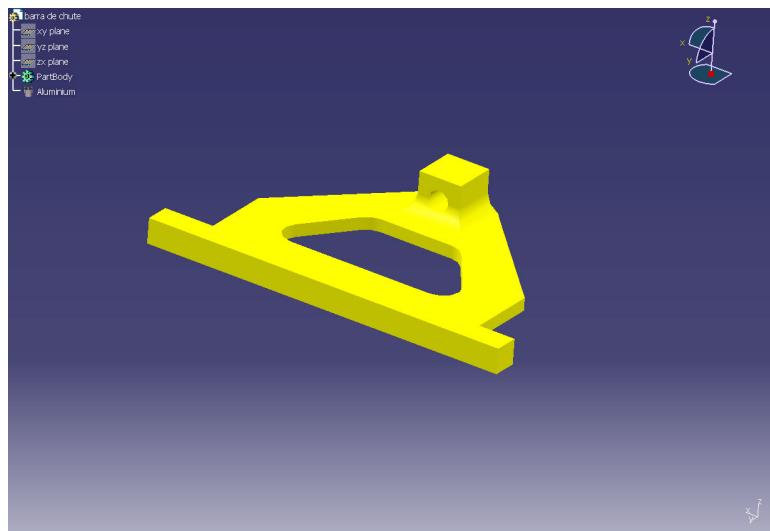


Figura 14: Vista isométrica da barra de chute.

Sua fixação será por meio de uma rosca M4 e será parafusada diretamente na haste do nosso solenóide. Com isso podemos ajustar a distância que a barra fica da bola quando não está acionada. Para travá-la, colocamos uma contra porca no próprio eixo do solenóide.

A barra será apoiada em dois pequenos suportes que serão parafusados na chapa base do robô e deslizará diretamente sobre elas com a ajuda de um lubrificante para se reduzir o atrito.

4.4 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

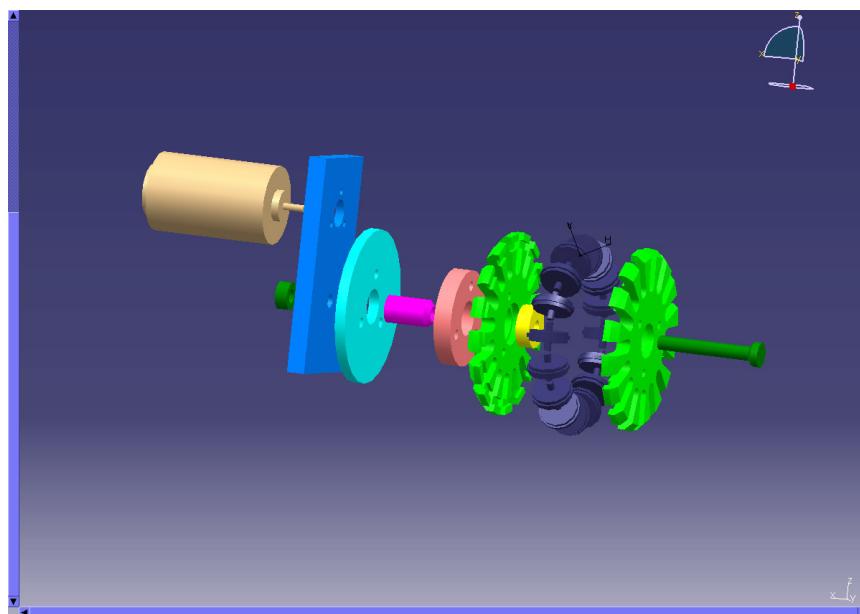


Figura 15: Vista explodida do sistema de movimentação.

O sistema de movimentação foi projetado levando-se em conta o motor e a relação de transmissão que calculamos anteriormente. Conseguimos encontrar um par de engrenagens que gera aquela relação de transmissão calculada anteriormente de $i = 6$.

A coroa vai fixada na roda por meio de 3 parafusos. Ela possui 84 dentes e um módulo igual a 0,5. Ela é feita de aço o que torna a engrenagem mais durável já que o desgaste dos dentes é muito menor do que se elas fossem de plástico.

O pinhão vai fixado por interferência no eixo do motor. Para isso, tivemos que mudar o diâmetro interno da engrenagem prensando uma bucha e fazendo um novo furo.

Para o robô se tornar omnidirecional a roda possui 16 roldanas perpendiculares à linha de simetria da roda. Elas são fixadas na roda através de pequenos eixos que passam pelo furo central da roldana.

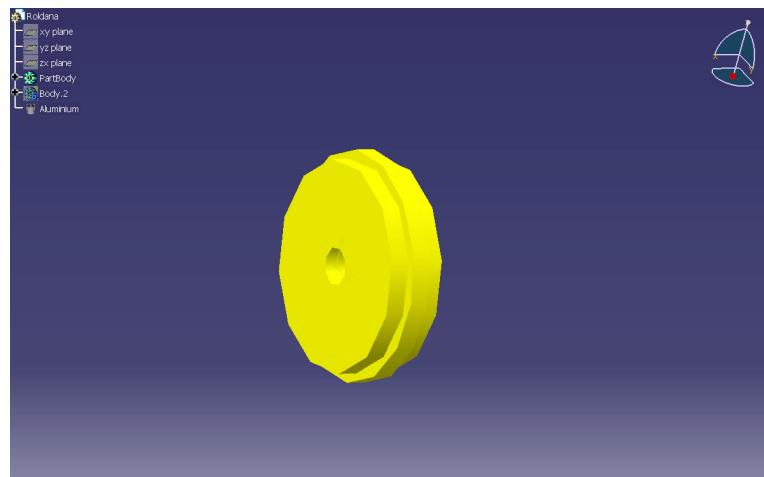


Figura 16: Vista isométrica da roldana.

As roldanas possuem esse formato para melhorar a aderência com o campo, mas serão necessários alguns testes para ver se esse tipo de roldana não irá danificar o campo. Caso seja comprovado que esse formato danifica o campo, já possuímos um outro tipo desenhado onde serão colocados anéis de borracha conhecidos como o-ring.

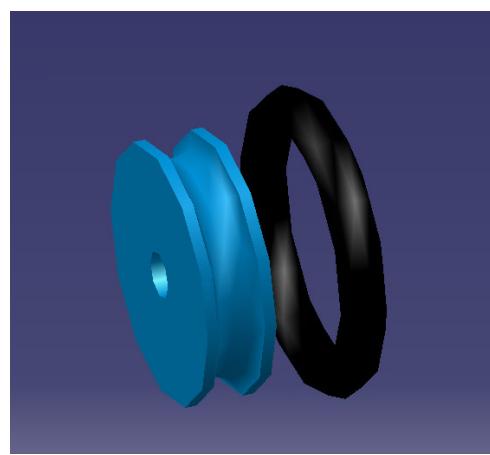


Figura 17: Vista isométrica da roldana com o-ring

Com isso a usinagem da roda se torna complexa já que precisa conter 16 roldanas e abrigar um rolamento em seu interior. Ela é constituída de duas metades quase simétricas onde à única diferença é que em uma se encontram 3 roscas para abrigar os parafusos que fixam a coroa na roda e fecham as duas metades.

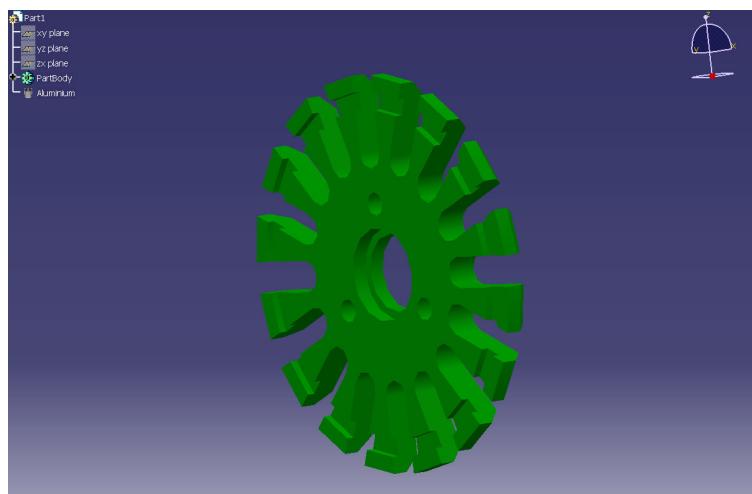


Figura 18: Vista isométrica da metade da roda

O eixo que estamos utilizando não gira com a roda. Ele sustenta e trava axialmente o rolamento de cada roda, funcionando como se fosse uma viga redonda em balanço. Para isso não precisamos projetar o eixo como se fosse um eixo rotativo.

Em sua ponta existe uma rosca M4 onde será rosqueada uma porca, criando-se uma força axial que trava o rolamento, mantendo o alinhamento da roda com o robô. Abaixo está o cálculo do torque máximo de aperto da porca para não danificar a rosca do eixo.

Dados da rosca M4 classe 4.6:

$$\sigma_e = 240 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r = 400 \text{ MPa}$$

$$d = 4 \text{ mm}$$

$$P = 0,7 \text{ mm}$$

$$d_2 = 3,545 \text{ mm}$$

$$d_3 = 3,141 \text{ mm}$$

$$A_s = 8,78 \text{ mm}^2$$

Cálculo:

$$n = 1,4$$

$$M_{ap} = 0,2 \cdot F_{ap} \cdot d = 0,2 \cdot F_{ap} \cdot 4 = 0,8 \cdot F_{ap}$$

$$M_g = 0,5 \cdot M_{ap} = 0,4 \cdot F_{ap}$$

$$\frac{240}{1,4} \geq \sqrt{\left(\frac{F_{ap}}{8,78}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot F_{ap}}{0,2 \cdot 3,141^3}\right)^2}$$

$$29387,8 \geq 0,012972 \cdot F_{ap}^2 + 1,2496 \cdot 10^{-2} \cdot F_{ap}^2$$

$$F_{ap} \leq 1074,2 \text{ N}$$

$$M_{ap} \leq 0,2 \cdot 1074,2$$

$$M_{ap} \leq 214 \text{ Nmm} \rightarrow M_{ap} \leq 0,21 \text{ Nm}$$

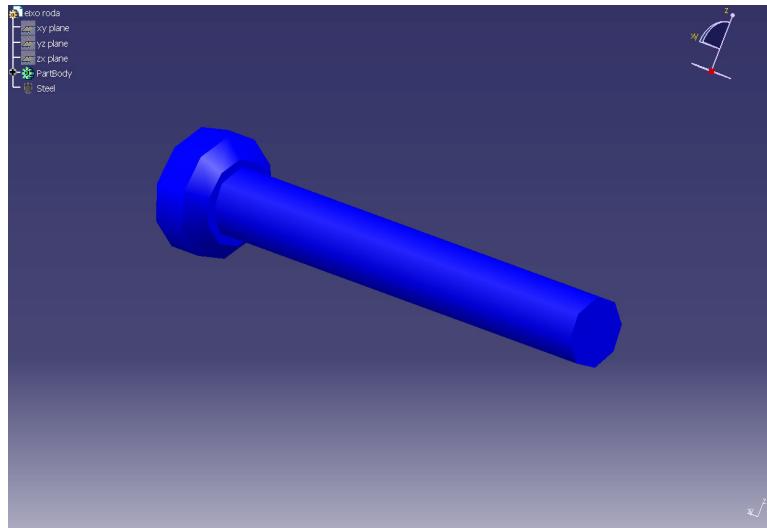


Figura 19: Vista isométrica do eixo da roda

O motor será fixado em uma coluna que possui um rebaixo e furação dimensionadas para a fixação do motor. Nessa mesma base será fixado o nosso eixo, fazendo com que a distância entre o eixo do motor e do nosso eixo não varie, diminuindo as chances de escorregamento de dentes nas engrenagens.

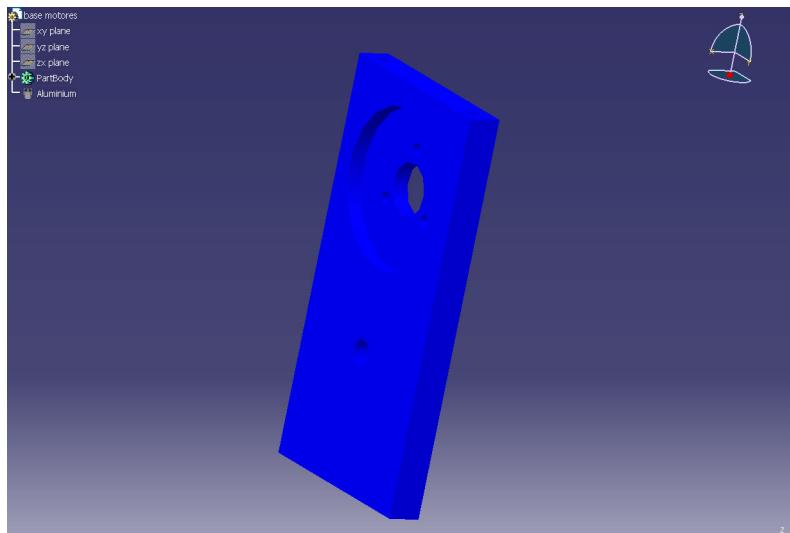


Figura 20: Vista isométrica da coluna dos motores

4.5 PROJETO DO SISTEMA DE DRIBLE

Nosso sistema de drible constitui de duas colunas onde são fixados rolamentos. Entre essas colunas e alinhado aos rolamentos está nosso eixo que é a parte principal de nosso sistema. Ele é quem gira a bola contra o robô, fazendo com que a mesma crie uma força contra o robô.

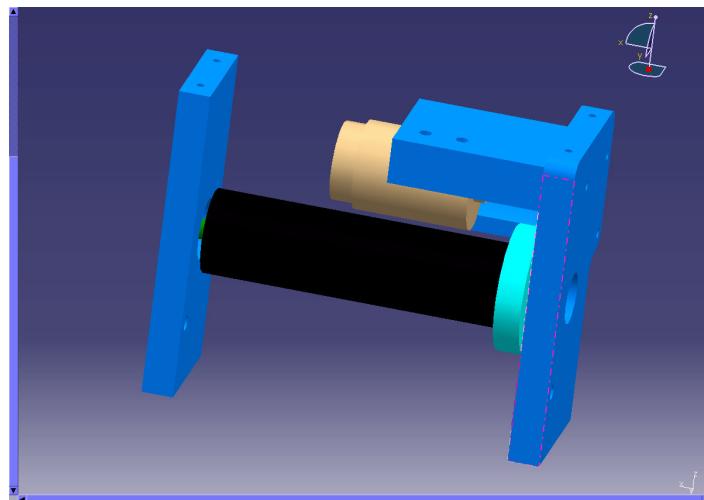


Figura 21: Vista do sistema de drible montado

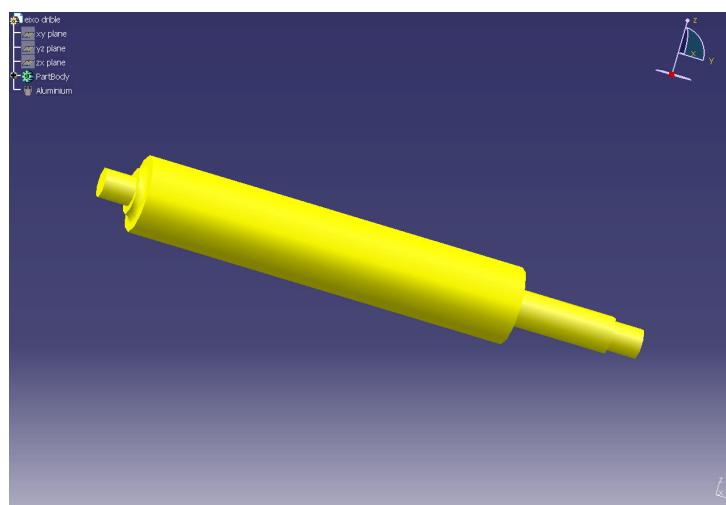


Figura 22: Vista do eixo de drible montado

Ele possui um rebaixo em seu lado direito onde será fixada uma engrenagem. Essa engrenagem possui um cubo com um pequeno parafuso trava eixo. Após a fixação da engrenagem no eixo será aplicado um revestimento de borracha no eixo que cobrirá todo o seu diâmetro maior e o cubo da engrenagem. Essa borracha serve para aumentar o atrito entre a bola e o eixo, para que a bola escorregue somente no campo.

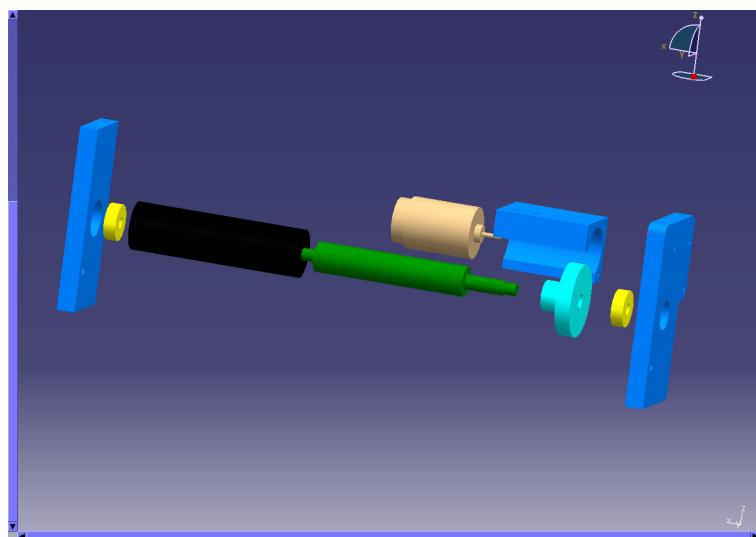


Figura 23: Vista explodida do sistema de drible

O motor é fixado por uma base que possui um furo com o diâmetro do motor e dois parafusos M4 para travar ele axialmente. Radialmente o motor não se solta já que o rasgo do suporte que o abriga possui um ângulo menor que 180° sendo necessário somente travá-lo contra deslocamentos axiais.

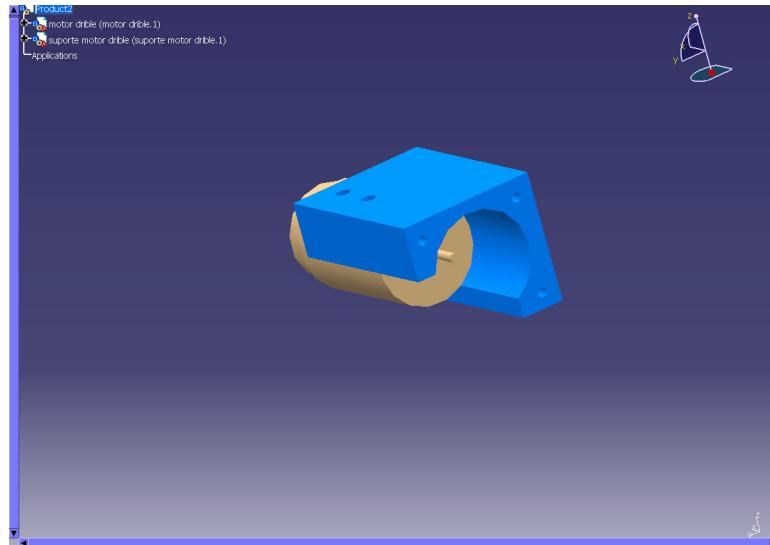


Figura 24: Montagem do motor na base

A engrenagem que vai presa ao motor também possui um cubo com um parafuso trava-eixo. Como as engrenagens foram compradas e não fabricadas, não conseguimos encontrar uma com um furo com a mesma dimensão do eixo, por isso tivemos que colocar material nesse furo e realizar um novo com o diâmetro do eixo do motor (fig. 23).

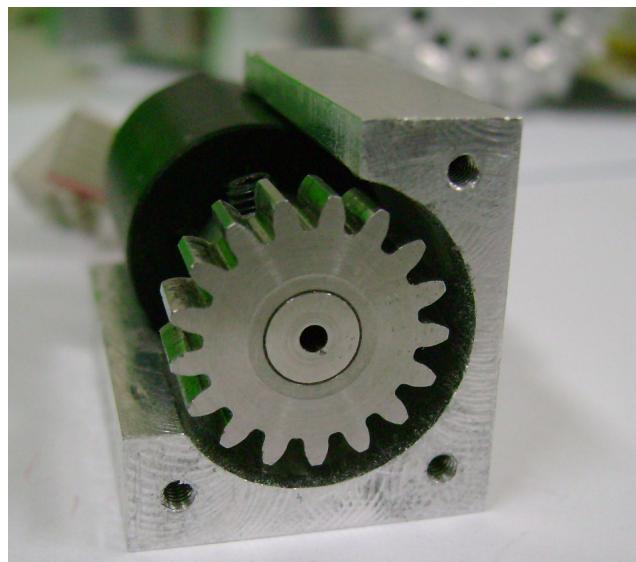


Figura 25: Detalhe da engrenagem do drible

4.6 CHAPAS

Tanto o sistema de drible quanto o de movimentação são fixados entre duas chapas. Suas colunas funcionam como a própria estrutura do robô. Denominamos a chapa inferior como chapa base e a superior como chapa eletrônica, já que é onde a eletrônica será instalada. Ambas serão feitas de uma chapa de alumínio de 1,5mm de espessura que será cortada a laser.

A furação da chapa base (fig. 24) levou em conta a fixação do solenóide, dos suportes que sustentam a barra de drible e a fixação das baterias, além da fixação das colunas do sistema de drible e de movimentação.

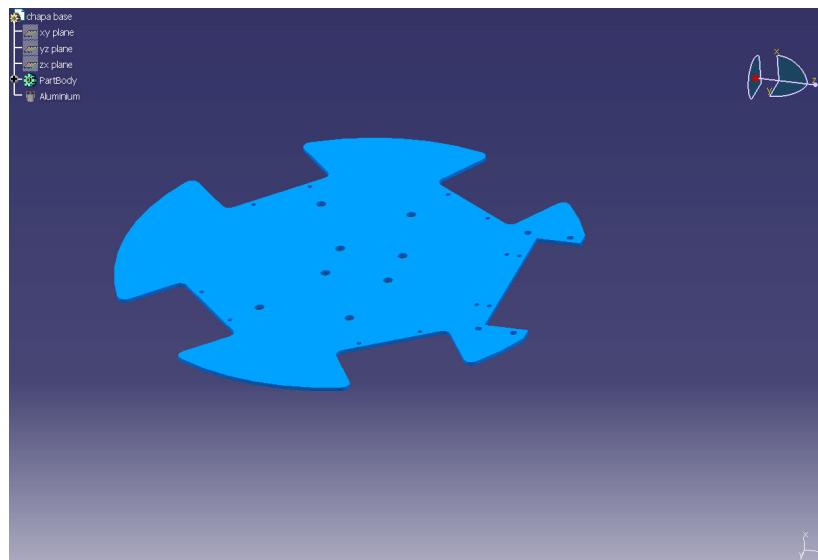


Figura 26: Vista da chapa base

Na chapa da eletrônica, (fig. 28) tivemos que prever a passagem dos fios que sobem dos cinco motores, das quatro baterias, do capacitor do sistema de chute, além da furação das colunas do sistema de drible e movimentação e das colunas que sustentam as placas eletrônicas.

A furação para a passagem dos fios tem que levar em conta os conectores que serão usados. Caso os conectores sejam quadrados ou retangulares, devemos medir

suas diagonais (fig. 27). Esse valor nos fala o diâmetro que o furo deve ter para que o conector passe. Para garantia sempre arredondamos o valor do diâmetro para cima.

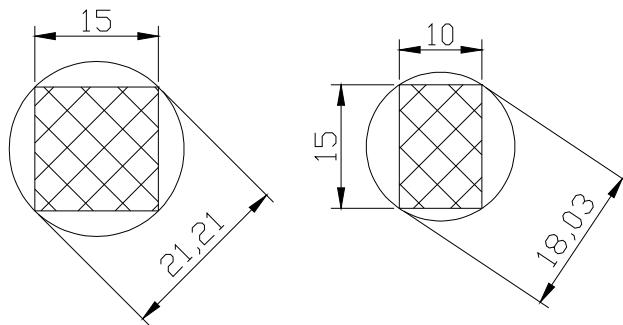


Figura 27: Exemplos de furações para conectores

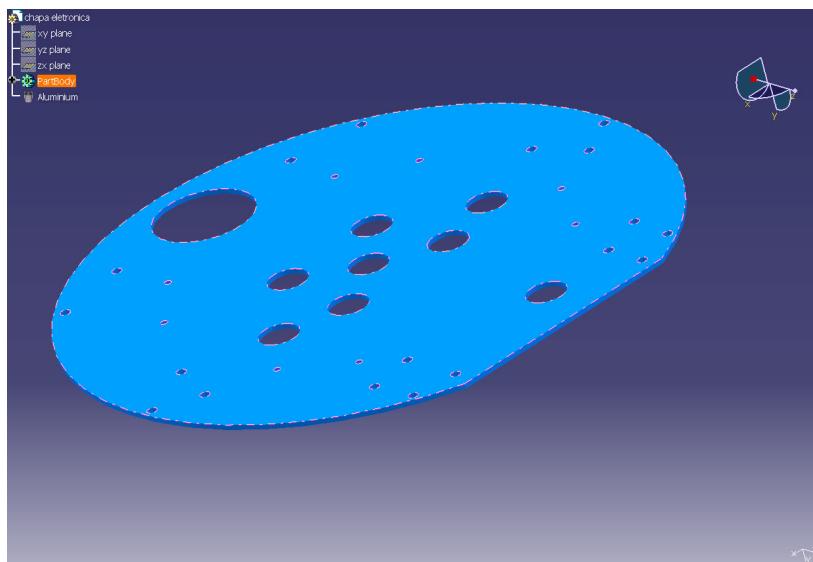


Figura 28: Vista da chapa da eletrônica

Foi desenhada uma chapa para ficar acima das placas da eletrônica, onde serão colados os círculos coloridos para a identificação de cada robô pelo sistema de visão (fig.29). Essa chapa como não sofre esforço nenhum e para reduzirmos o peso do

robô, será fabricada em fibra de vidro (o mesmo material das placas da eletrônica) e será pintada de preto para não afetar o sistema de visão.

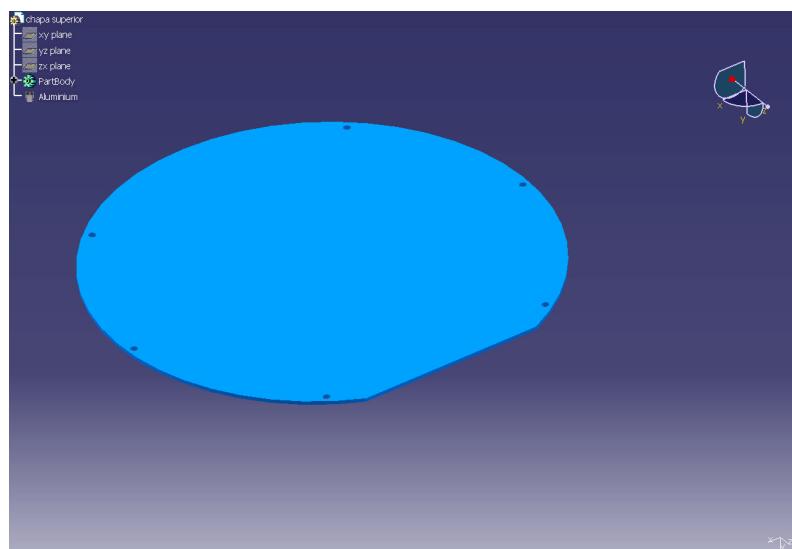


Figura 29: Vista da chapa superior

5 Montagem e Testes

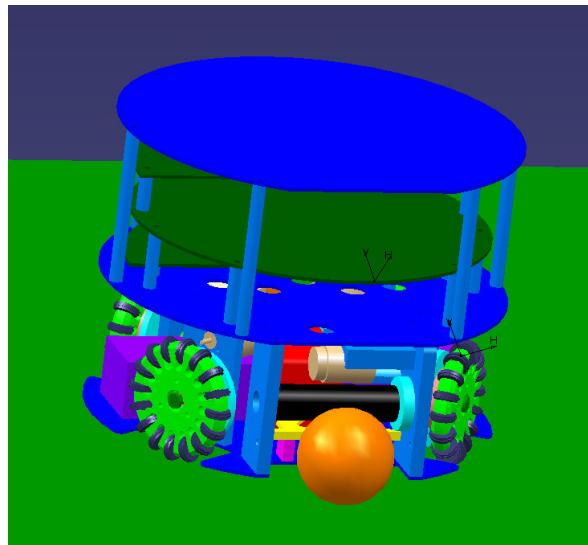


Figura 30: Montagem completa do robô.

Depois de confeccionadas todas as peças, iniciamos a montagem do robô. Como já mencionado anteriormente, algumas peças tiveram que ser reajustadas, como no caso das engrenagens além de algumas peças que foram usinadas, mas que ficaram fora das dimensões desejadas.

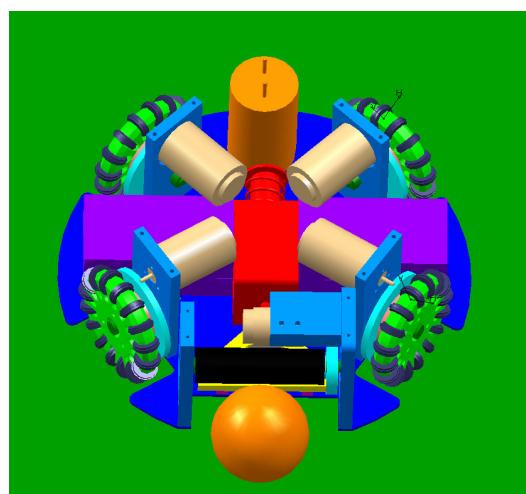


Figura 31: Montagem do robô aberto.

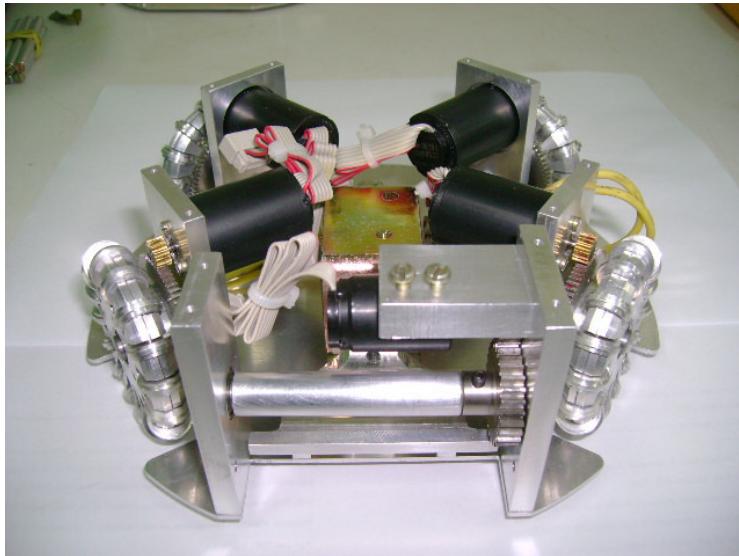


Figura 32: Foto da montagem do robô aberto



Figura 33: Foto da montagem do robô sem a chapa superior

Após esses ajustes nós conseguimos montar e testar o sistema de movimentação, que é considerado o principal sistema de nosso robô. No início tivemos problemas com o engrenamento que em certo ponto travava nosso sistema. Isso ocorria pelos furos que foram feitos na engrenagem estarem excêntricos ao centro da roda. Depois

de ajustados esses furos, ligamos os motores na fonte de alimentação e concluímos que estavam girando corretamente.

O próximo passo foi a montagem do sistema de chute. Para isso prendemos a barra de chute no eixo do solenóide e o parafusamos na chapa base. Conseguimos testar o chute, analisando a velocidade da bola pelo nosso antigo sistema de visão. Posicionamos o robô encostado em uma das laterais do campo com a bola encostada em seu eixo do drible e acionamos o chute. O sistema de visão antigo que sofreu algumas melhorias para ser possível realizar esse tipo de teste captou a bola e nos gerou um gráfico do deslocamento (fig. 34).

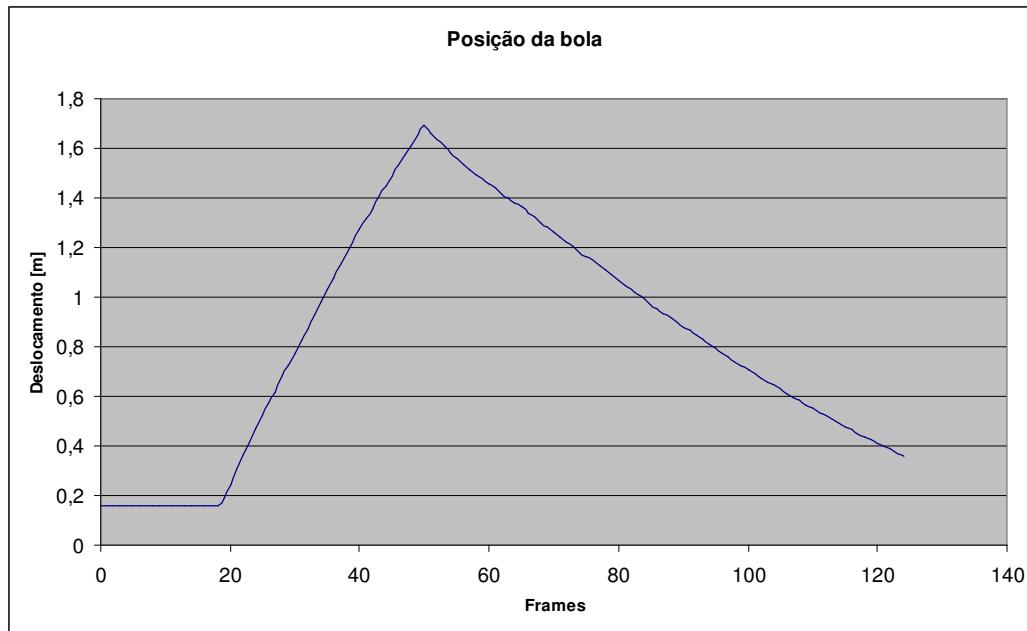


Figura 34: Gráfico do deslocamento da bola

Com esse gráfico do deslocamento pela quantidade de frames e considerando que temos 30 frames em 1 segundo de gravação, podemos retirar a velocidade média da bola. Com a tabela da qual foi gerado esse gráfico e considerando um intervalo do frame 20 ao 40 que foi um instante logo após o chute:

$$V_M = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1,27 - 0,24}{\frac{40 - 20}{30}} = 1,54 \text{ m/s}$$

Considerando que o robô esteja posicionado na metade do campo, isto é, a 2,45 m da linha do gol, podemos calcular o tempo que a bola levaria para chegar ao gol.

$$t = \frac{x}{V} = \frac{2,45}{1,54} = 1,6 \text{ s}$$

Com isso podemos dizer que o time adversário terá que interceptar a bola em 1,6 s para que ela não cruze a linha do gol.

O sistema de drible foi o próximo a ser montado e testado. Ele funcionou perfeitamente quando ligado na fonte de alimentação. Somente tivemos que ajustar dois furos da base que seguram o motor.

As chapas por terem sido cortadas à Laser, ficaram com um acabamento muito bom. Suas dimensões também ficaram todas dentro das especificadas.

Agora esperamos os ajustes finais na eletrônica para podermos realizar testes mais profundos em nosso robô. Desejamos testar seu controle para verificar se o robô está fazendo a trajetória que foi estipulada ou se será necessário algum tipo de ajuste em nossos sistemas. Após esses testes, se concluirmos que nosso robô está atendendo todas as nossas expectativas, iremos construir o nosso time completo.

6 Conclusão

O protótipo que construímos atendeu as nossas expectativa iniciais. Precisamos agora elaborar um sistema de controle para o nosso robô e um novo sistema de visão para que possamos testá-lo com uma maior precisão.

Quanto ao funcionamento do robô, todos os sistemas funcionaram corretamente. No sistema de movimentação, tivemos algumas dificuldades para montar o pinhão no motor. Por uma má qualidade na usinagem, tivemos que retrabalhar o furo efetuado na engrenagem para que ela pudesse ser fixada sob pressão. Para garantir que a engrenagem não escorregue no eixo, foi adicionado um pouco de cola especial para metais. O furo da engrenagem que vai presa à roda também teve de sofrer um retrabalho, pois estava excêntrico à roda e com isso o engrenamento estava sendo prejudicado.

Acreditamos que o robô será competitivo, pois todos os seus dispositivos foram projetados para alcançar o máximo desempenho possível com um custo mínimo para se ter competitividade. Após esses testes finais, se nosso protótipo alcançar nossas expectativas, vamos construir um time completo para entrarmos nas competições. Nosso robô também servirá como uma plataforma de futuras pesquisas na área da robótica como a utilização de uma visão local, novos sistemas de controle além de muitas outras áreas a serem exploradas.

7 Referências Bibliográficas

- [1] – *Official RoboCup Small Size League*. Disponível em:
<http://www.cs.cmu.edu/~brettb/robocup>. Acesso em: 3 set. 2006.
- [2] – *Furgbol*. Disponível em:
<http://www.ee.furg.br/~furgbol/robo/omni.html>. Acesso em: 3 set. 2006.
- [3] – *Rules for the “very small category”*. Disponível em:
http://www.robopuc.cl/larc/documents/LARC_2006_verysmallsize.pdf#search=%22very%20small%20category%22. Acesso em: 3 set. 2006.
- [4] – *Robocup*. Disponível em:
<http://www.robocup.org>. Acesso em: 3 set. 2006.
- [5] – *The Futepoli Team Homepage*. Disponível em:
<http://www.lti.pcs.usp.br/robotics/futepoli>. Acesso em: 3 set. 2006.
- [6] - A. H. R.; Pegoraro, R. - Construindo Robôs Autônomos para Partidas de Futebol:
O Time Guaraná (1999)
- [7] – *Laws of the F180 League 2006*. Disponível em:
<http://www.cs.cmu.edu/~brettb/robocup/rules/f180rules2006.html>.
Acesso em: 8 set. 2006.
- [8] – Diseño e implementación de los Robots F180 del ITAM (Instituto Tecnológico Autônomo de México), 2006.
- [9] – *Whell Assembly*. Desenho técnico. (2003). Disponível em:
http://robocup.mae.cornell.edu/documentation/robocup/2003/drawings/f03-2-0300_exp_white.png. Acesso em: 8 set. 2006.
- [10] – VIERA JUNIOR, A. Elementos de Máquinas (Notas de aula da disciplina ME-5510 e ME-6520). Departamento de Engenharia Mecânica da FEI, 2005.

[11] – Catálogo de motores Maxon 2006. Disponível em:

<<http://www.maxonmotorusa.com>>. Acesso em: 22 jan. 2007.

[12] - *Cornell Robocup Documentation* . Disponível em:

<<http://robocup.mae.cornell.edu/documentation.php>>. Acesso em: 8 set. 2006.

[13] – *RoboCup Mechanical Engineering Documentation 2002*. Disponível em:

<<http://robocup.mae.cornell.edu/documentation/robocup/2002/2002ME.doc>>.

Acesso em: 8 set. 2006.

[14] – NORTON, ROBERT L. – *Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada*. Bookman, 2^a edição, 2004

[15] – Catálogo de motores Faulhaber. Disponível em:

<<http://www.faulhaber-group.com>>. Acesso em: 24 fev. 2007.

[16] – Catálogo de solenóides Soletec. Disponível em:

<<http://www.soletec.com.br>>. Acesso em: 27 mar. 2007.

APÊNDICE A - Desenhos

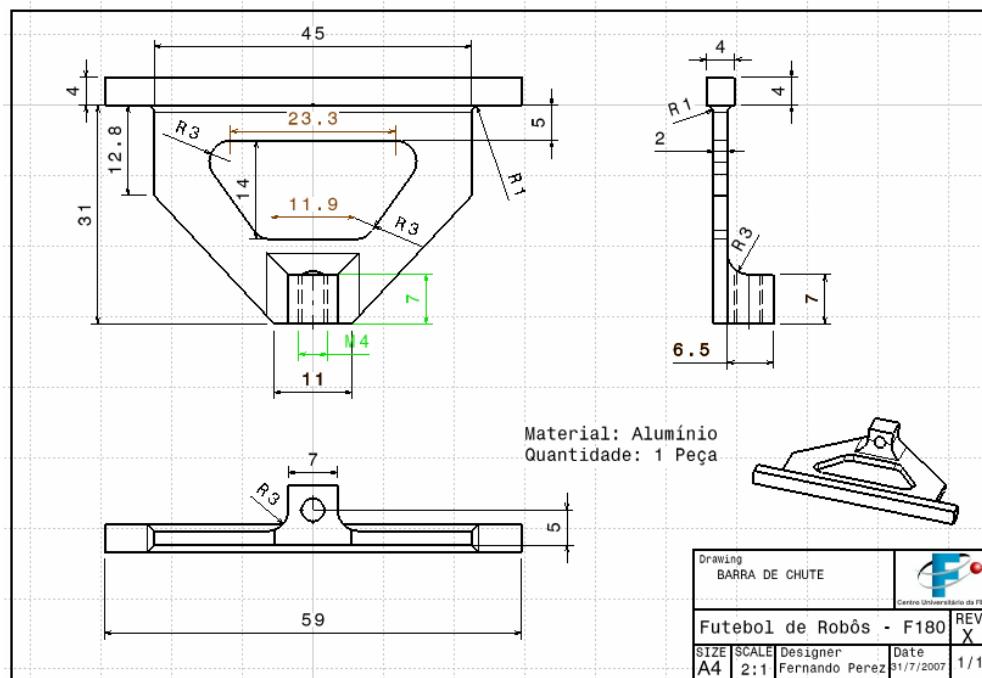


Figura 35: Desenho da barra de chute

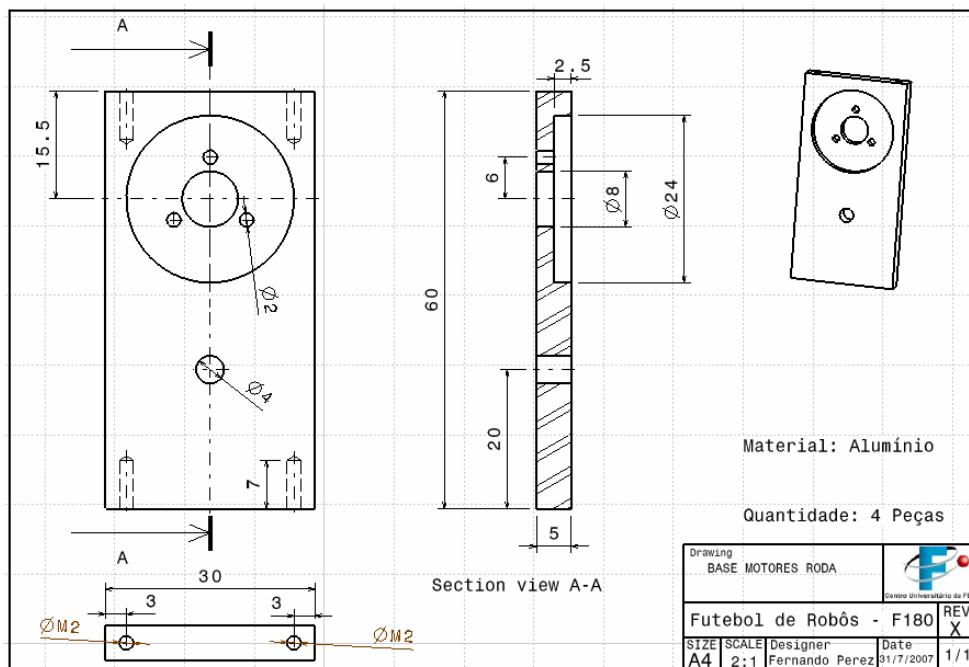


Figura 36: Desenho da base do motor da roda

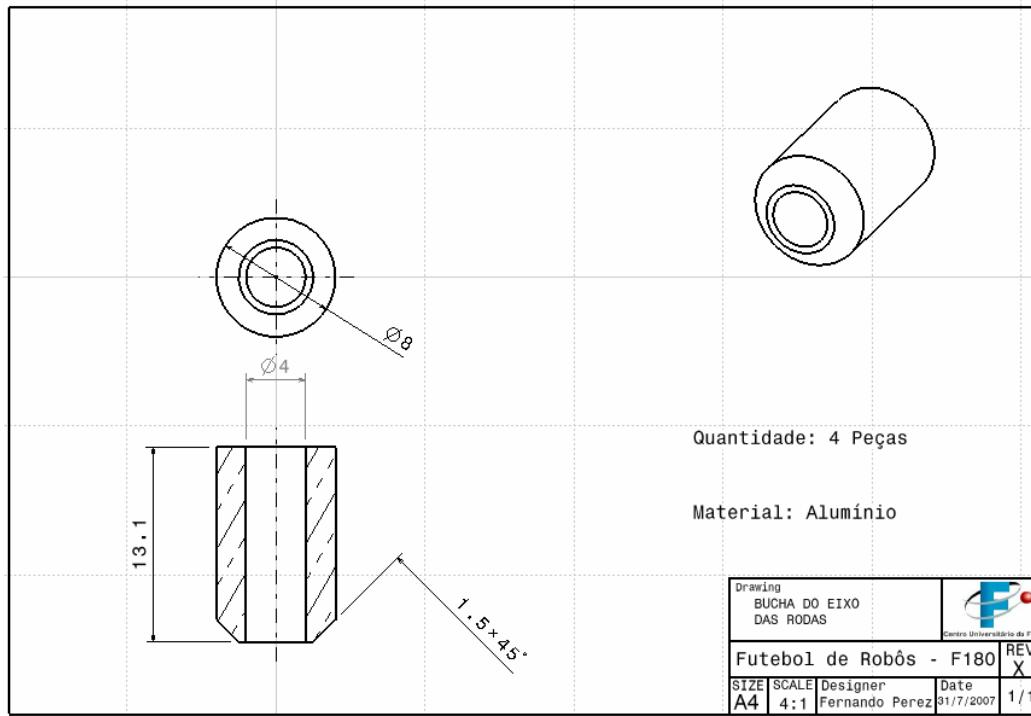


Figura 37: Desenho da bucha do eixo das rodas

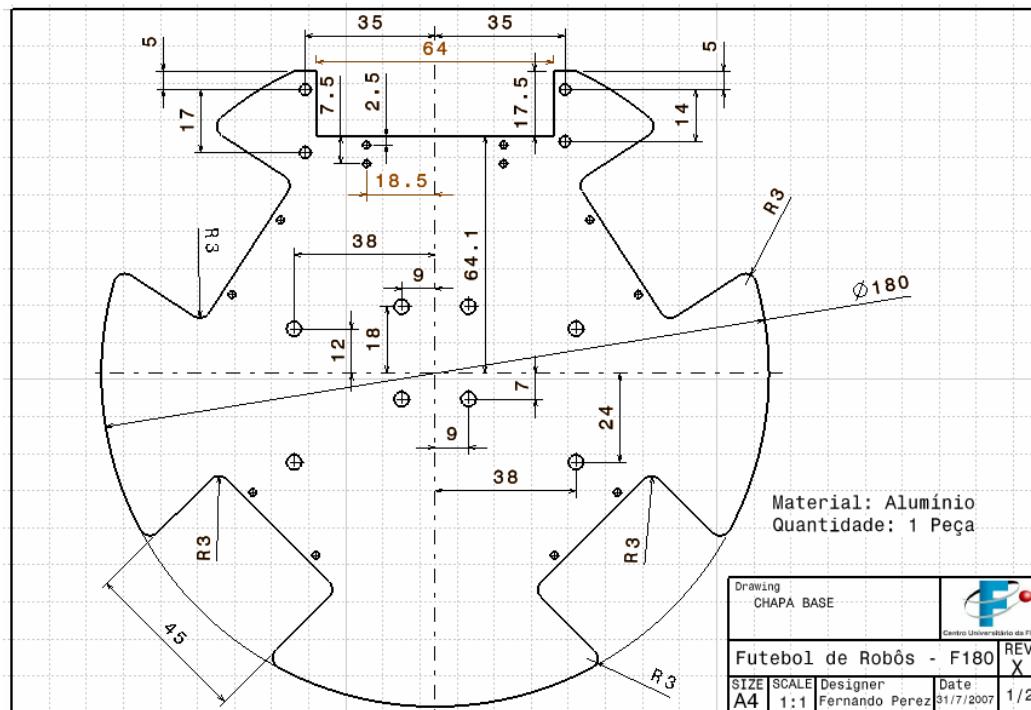


Figura 38: Desenho 1 da chapa base

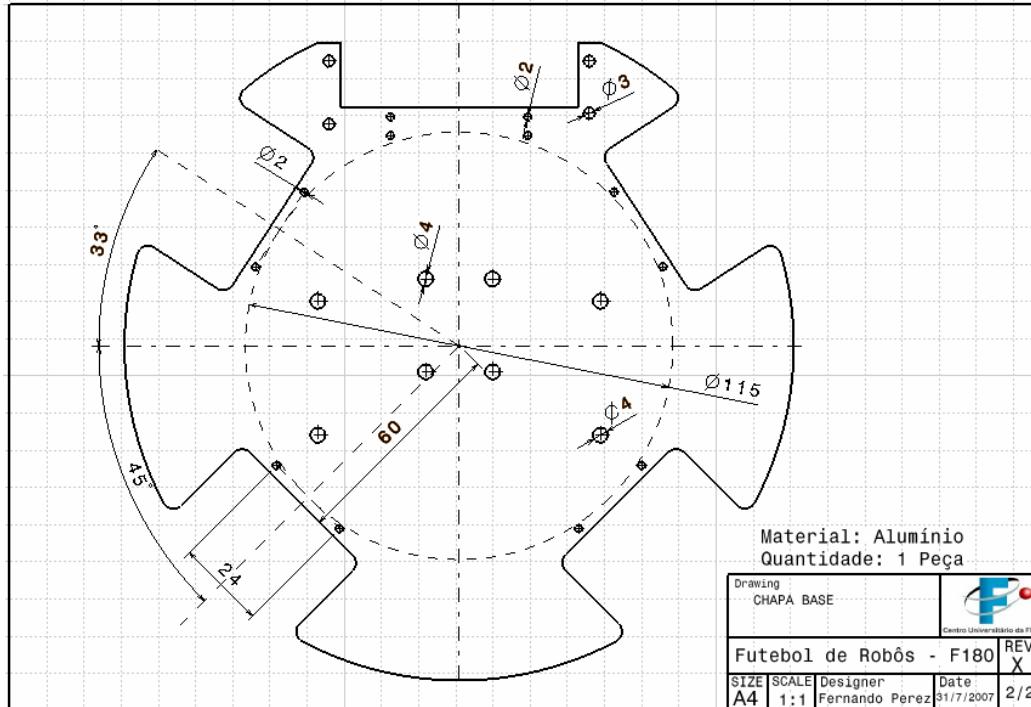


Figura 39: Desenho 2 da chapa base

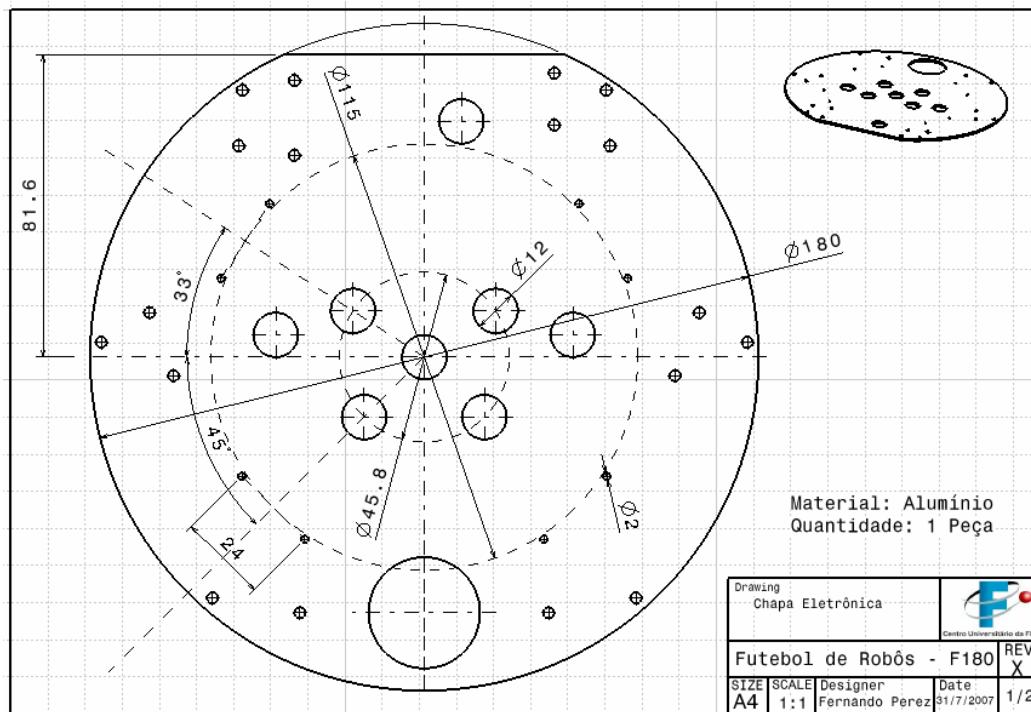


Figura 40: Desenho 1 da chapa da eletrônica

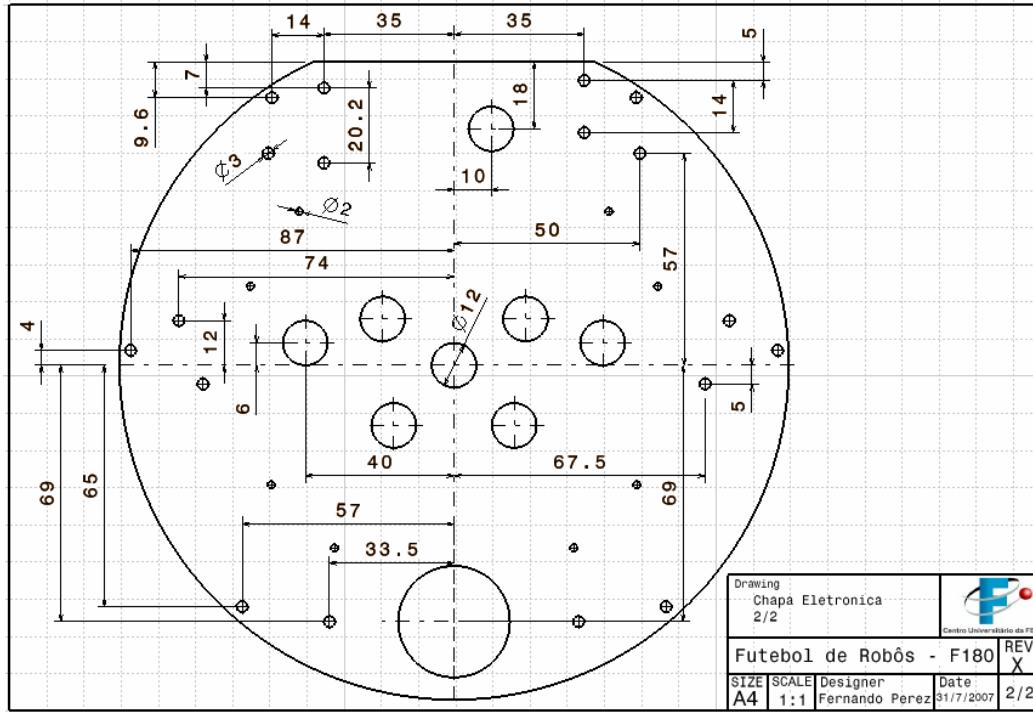


Figura 41: Desenho 2 da chapa da eletrônica

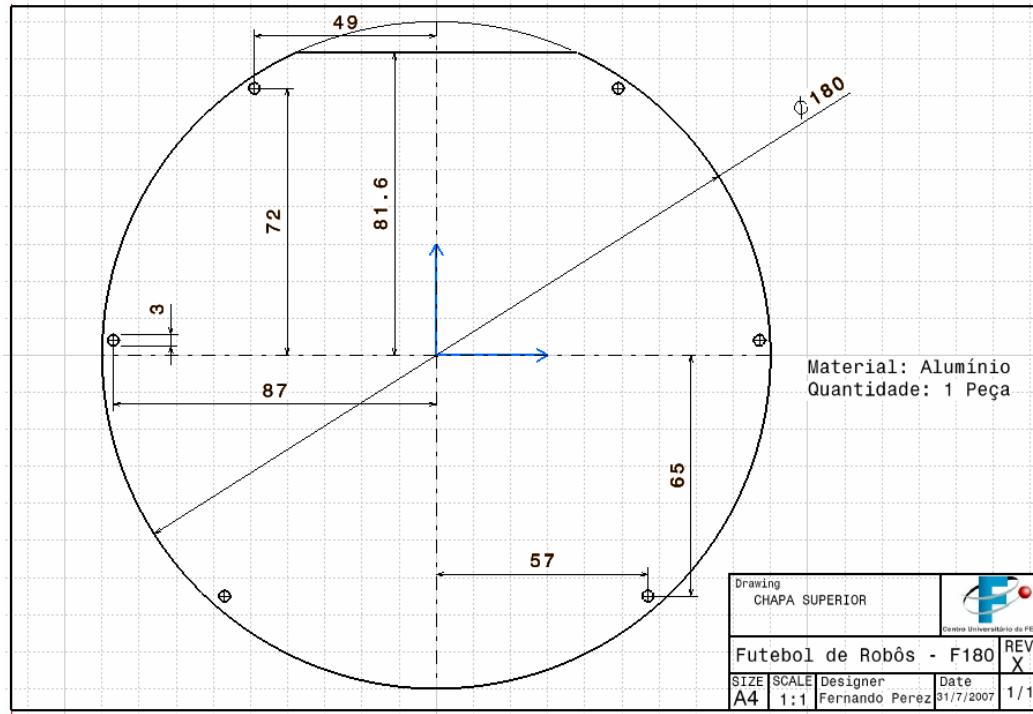


Figura 42: Desenho da chapa superior



Centro Universitário da FEI

Centro Universitário da FEI

Projeto de pesquisa

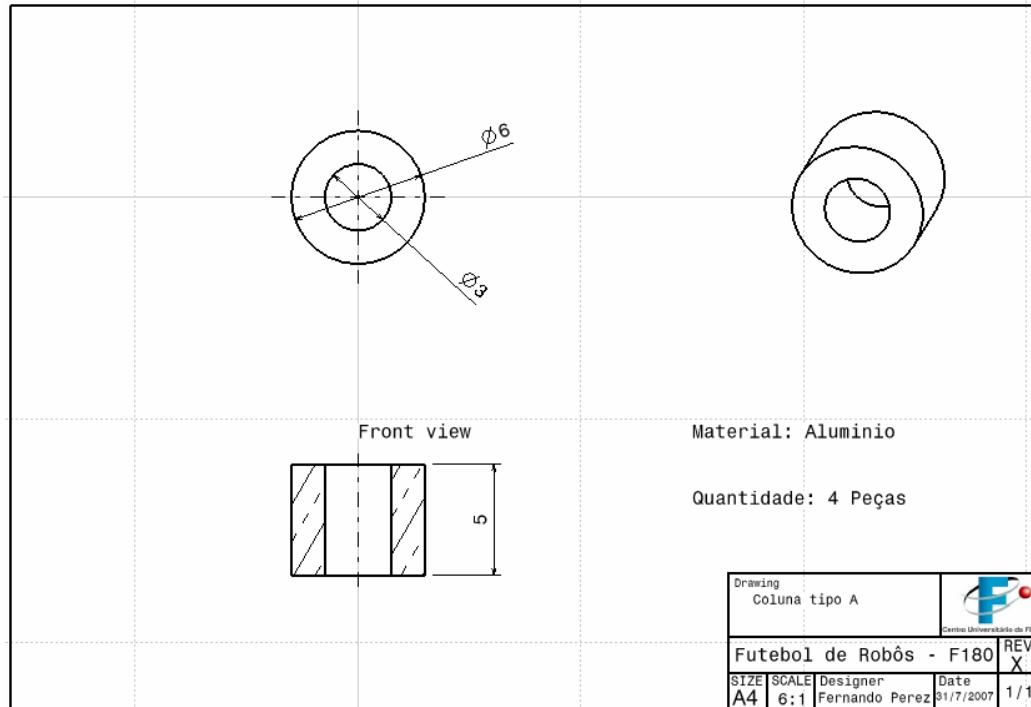


Figura 43: Desenho da coluna A

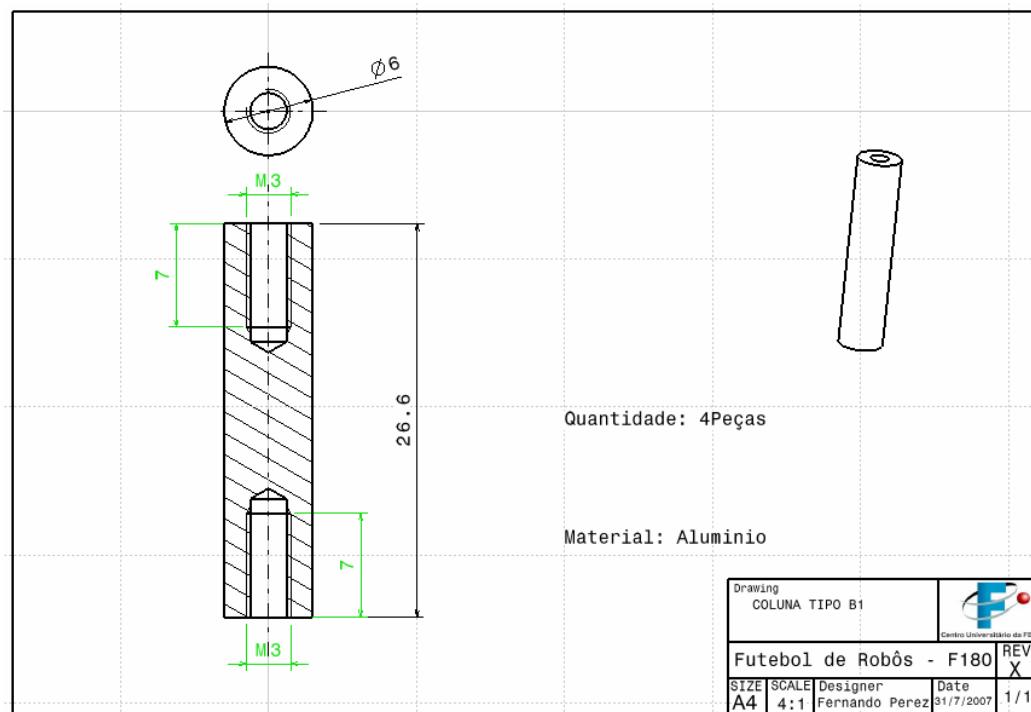


Figura 44: Desenho da coluna B1

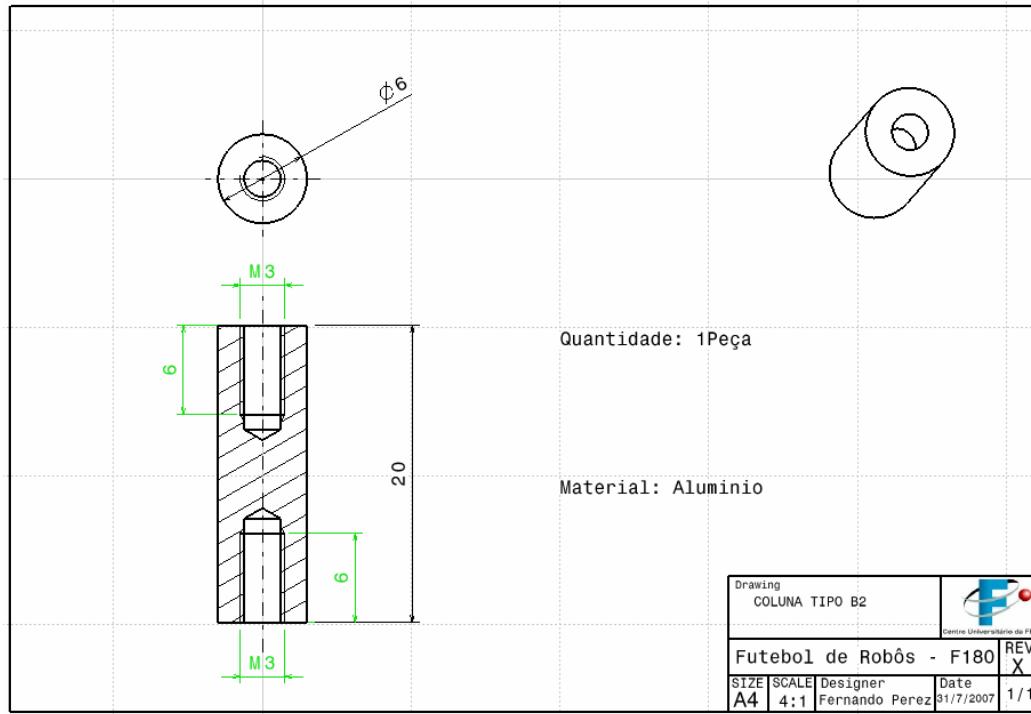


Figura 45: Desenho da coluna B2

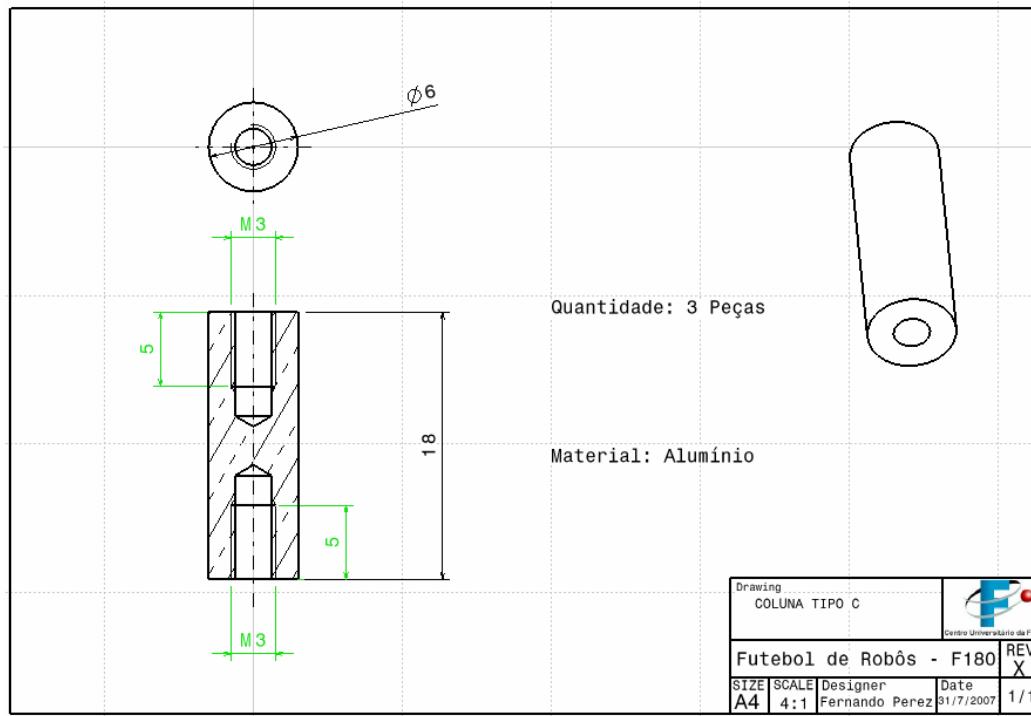


Figura 46: Desenho da coluna C

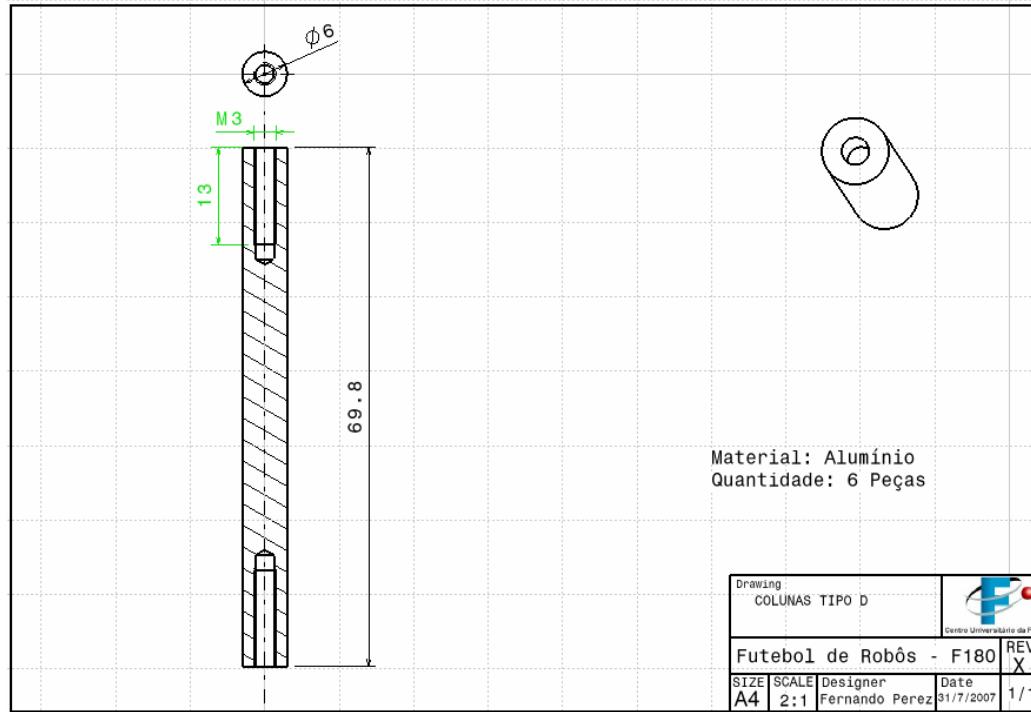


Figura 47: Desenho da coluna D

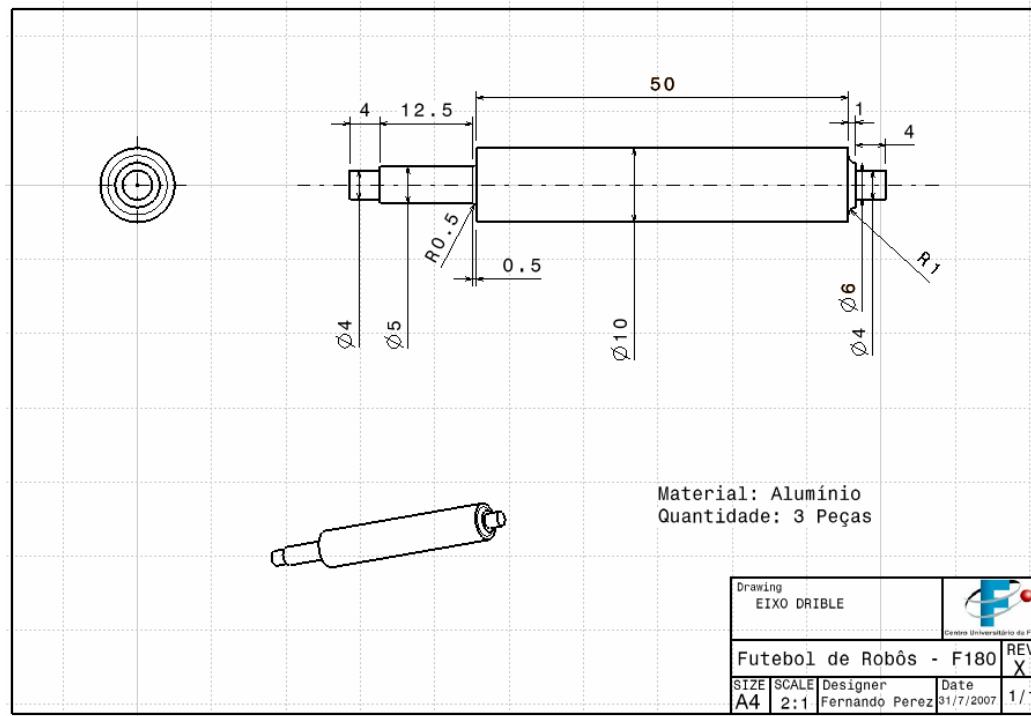


Figura 48: Desenho do eixo do drible

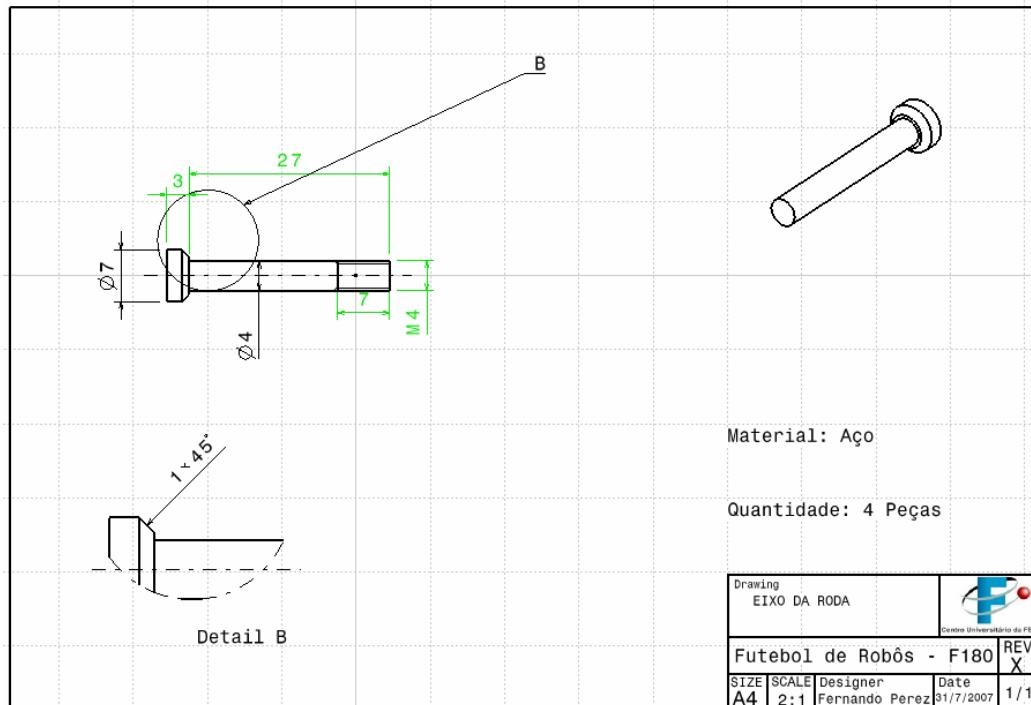


Figura 49: Desenho do eixo da roda

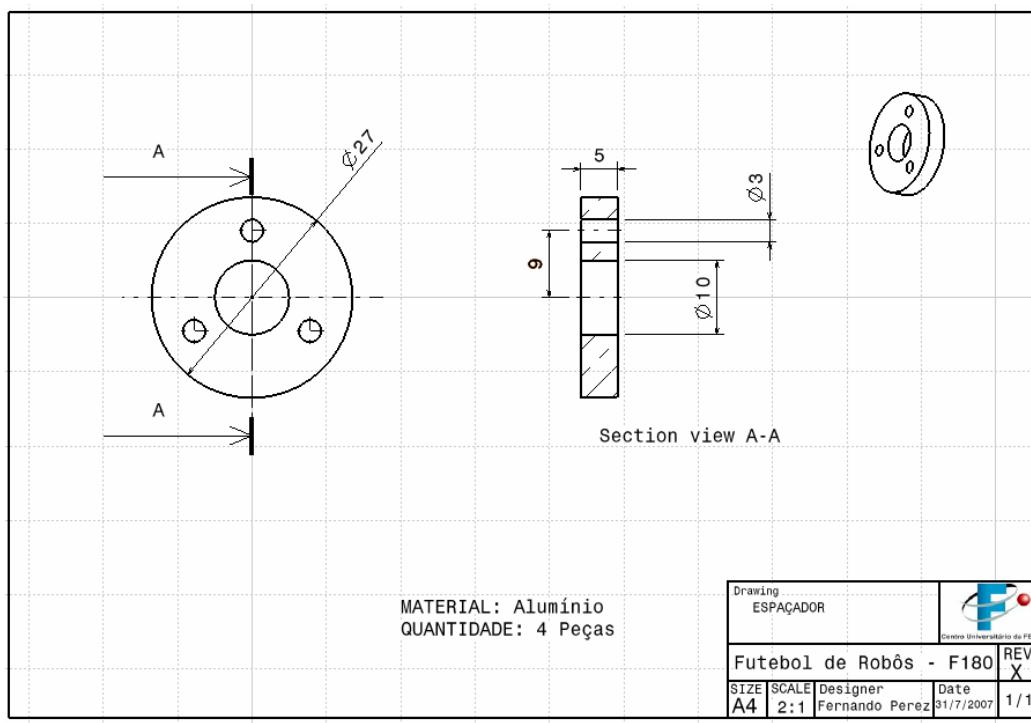


Figura 50: Desenho do espaçador da roda

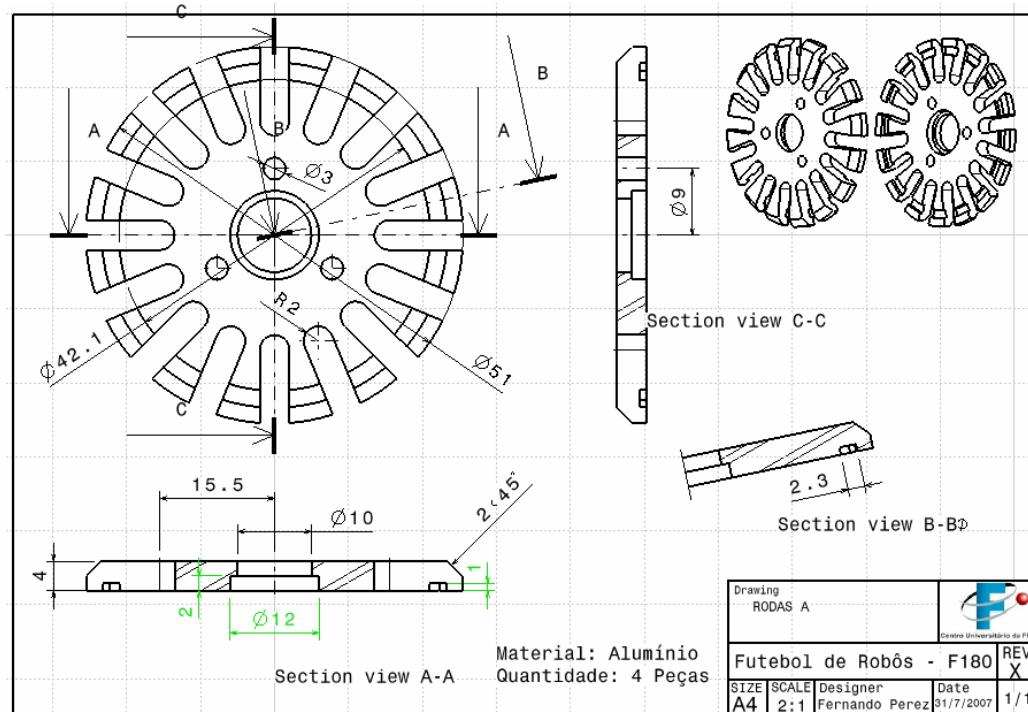


Figura 51: Desenho da Metade "A" da Roda

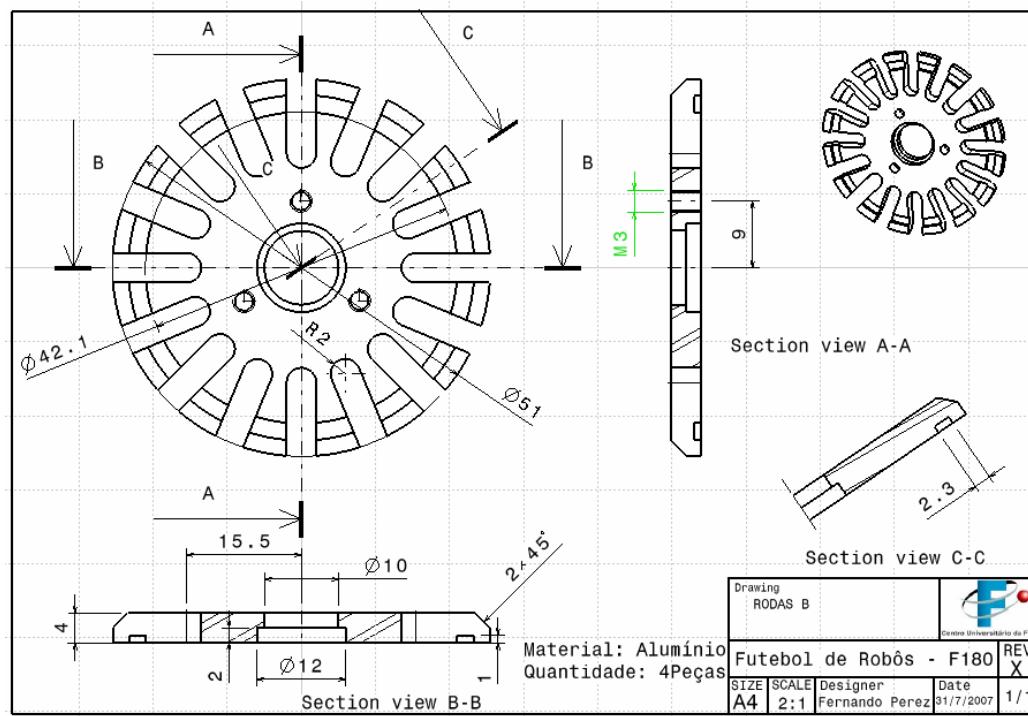


Figura 52: Desenho da Metade "B" da Roda

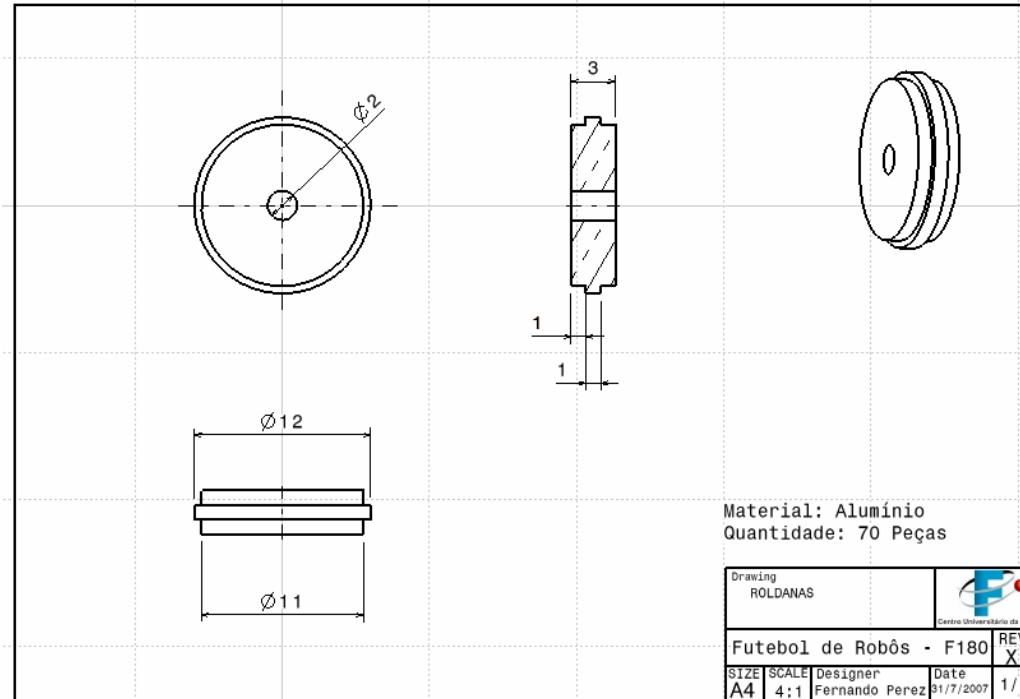


Figura 53: Desenho das Roldanas

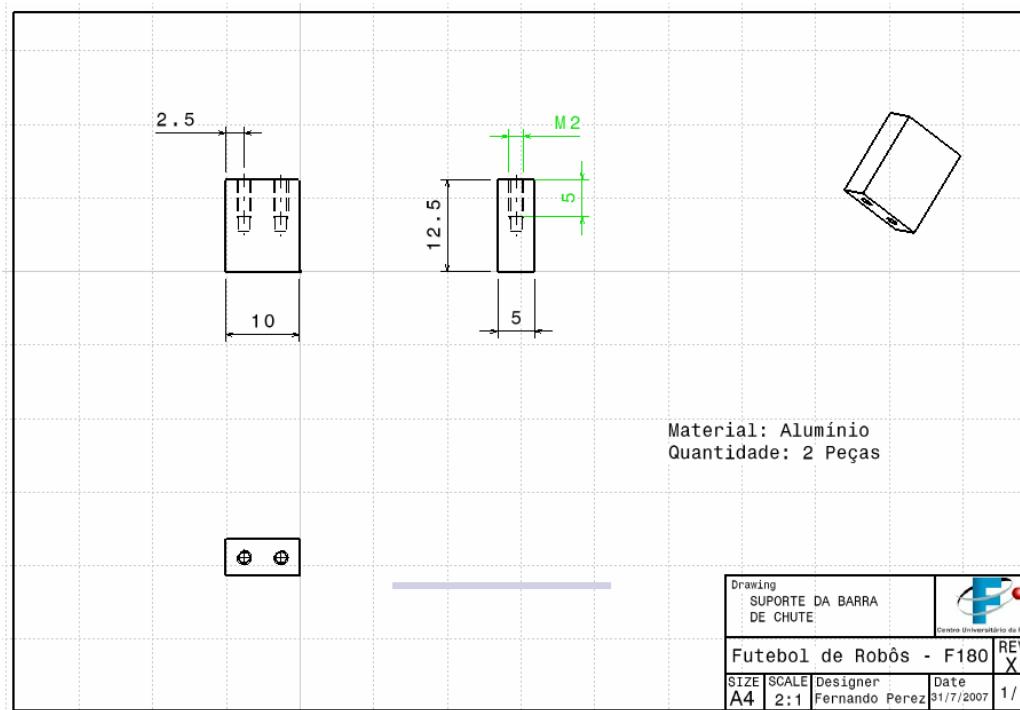


Figura 54: Desenho do suporte da barra de chute

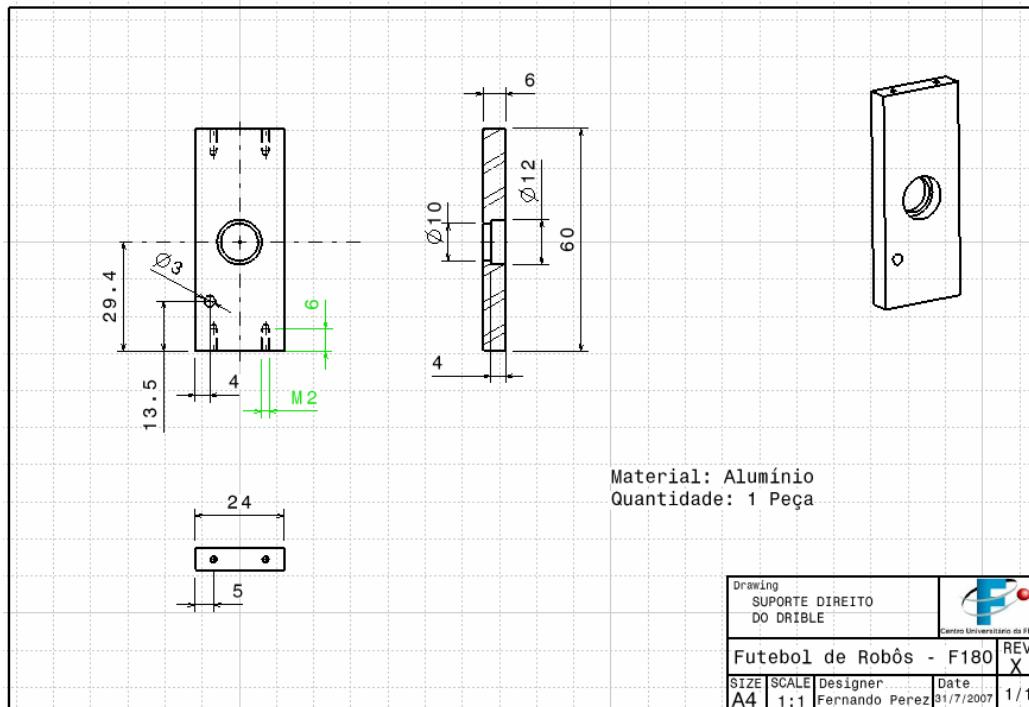


Figura 55: Desenho do suporte direito do drible

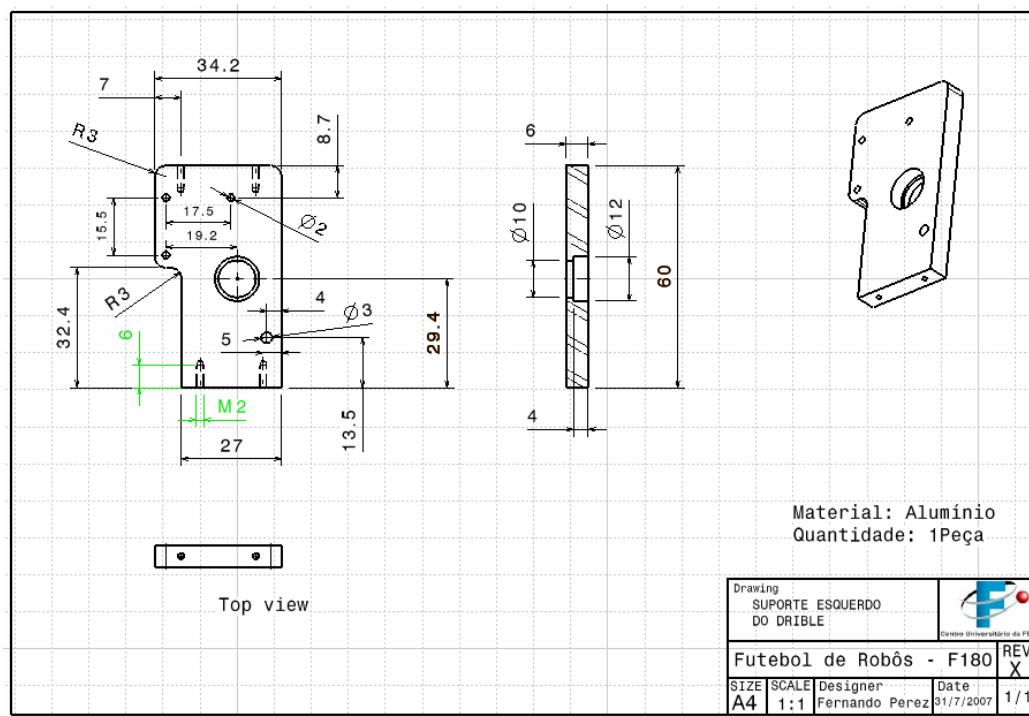


Figura 56: Desenho do suporte esquerdo do drible

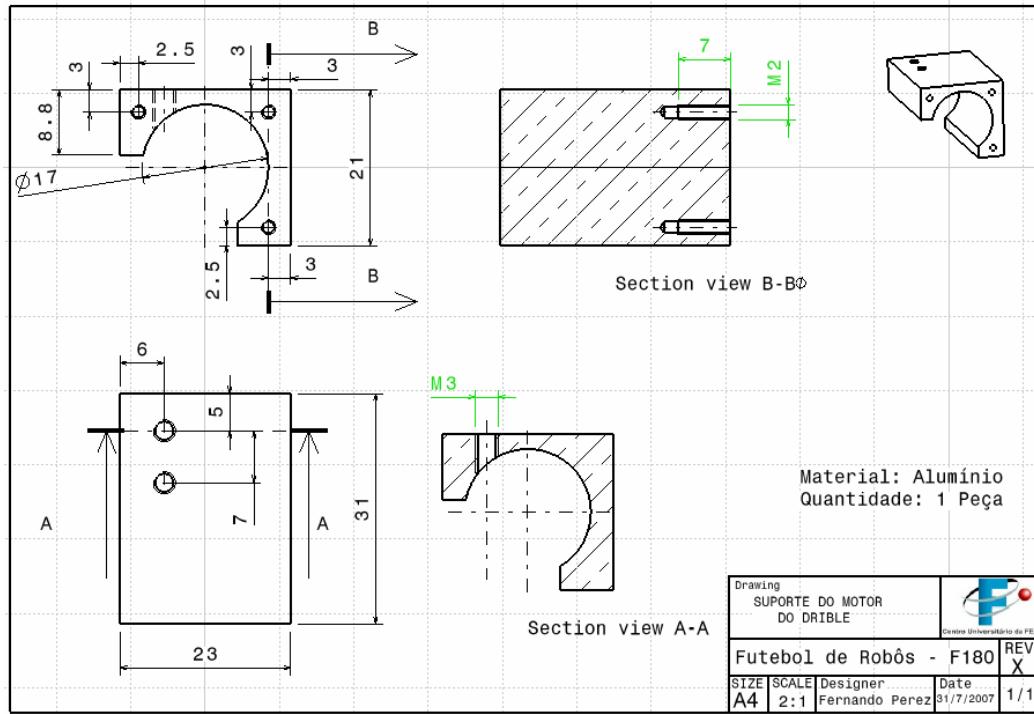


Figura 57: Desenho do suporte do motor do drible



Centro Universitário da FEI

Centro Universitário da FEI

Projeto de pesquisa



APÊNDICE B - Lista de Materiais

Qtd.	Descrição	Massa Unit. [g]	Massa Total [g]
1	Chapa Base	75	75
1	Chapa Eletrônica	95	95
1	Chapa Superior	102	102
1	Barra de Chute	8	8
4	Base dos Motores	21	84
4	Bucha do Eixo	1	4
4	Coluna A	0,02	0,08
4	Coluna B1	2	8
1	Coluna B2	1	1
3	Coluna C	1	3
6	Coluna D	5	30
1	Eixo do Drible	12	12
4	Eixo da Roda	3	12
4	Espaçador	7	28
4	Meia Roda A	12	48
4	Meia Roda B	12	48
64	Roldanas	0,80	51
1	Suporte do Drible Esquerdo	21	21
1	Suporte do Drible Direito	27	27
2	Suporte Barra de Chute	2	4
1	Suporte Motor do Drible	15	15
4	Bateria Li-Po	180	720
4	Motor Faulhaber 2232 006 SR c/ encoder IE2 512	62	248
1	Motor Faulhaber 1724 006 SR c/ encoder IE2 512	27	27
1	Solenóide SOLETEC Mod. 030 Série D	250	250
26	Parafuso M3 x 5	1	26
43	Parafuso M2 x 5	0,5	21,5
16	Parafuso M3 x 25	1,8	28,8
4	Parafuso M4 x 5	0,8	3,2
4	Porca M3	0,1	0,4
4	Porca M4	0,1	0,4
4	Pinhão Rodas A 1B 1 MY05014	1	4
4	Coroas Rodas s 12 N05M08450310	32	128
1	Pinhão do Drible S10 T08 M017S0505	18	18
1	Coroa do Drible S10 T08 1028 S0505	19	19
6	Rolamento 604 ZZ IJK	3	18

TOTAL [g]	2188,32
-------------	---------