

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

MURYLO PELIÇARO LOPES

**CONSTRUÇÃO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL *BALL AND BEAM*  
PARA O ENSINO DE CONTROLE AUTOMÁTICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2019

MURYLO PELIÇARO LOPES

**CONSTRUÇÃO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL *BALL AND BEAM*  
PARA O ENSINO DE CONTROLE AUTOMÁTICO**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Romero Felizardo

Coorientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Scannavino Junior

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2019



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Murylo Peliçaro Lopes**

**Construção de uma plataforma experimental "Ball and Beam" para o ensino de controle automático**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 02/05/2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Kleber Romero Felizardo - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Francisco de Assis Scannavino Junior - (Coorientador)

---

Prof(a). Dr(a). Vander Teixeira Prado - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Luiz Francisco Sanches Buzachero - (Membro)

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à Deus e à minha família, minha base e meu alicerce.

Aos meus pais, Cláudio e Regiane, que não mediram esforços para que eu alcançasse esta etapa da minha vida.

Aos meus irmãos, Mayara e Matheus, pelo apoio e pelas alegrias compartilhadas.

Aos meus avós, Abílio e Antonieta, que sempre me deram força e incentivo para que eu pudesse realizar meus sonhos e sempre me levantando quando caísse.

Enfim, ao restante da minha família e meus amigos de coração.

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem ter certeza que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Kleber Romero Felizardo e meu coorientador Prof. Dr. Francisco de Assis Scannavino Junior, por terem aceitado me guiar neste trabalho; sempre solícitos e sanando minhas dúvidas.

À minha banca pelos conselhos para o aperfeiçoamento deste trabalho no sentido de melhorar a sua qualidade.

Aos meus amigos, que sempre foram bons ouvintes no momento de desespero, mas também ótimas companhias nas conquistas dos objetivos.

Aos meus colegas de universidade e professores que contribuíram e marcaram a minha graduação.

Aos profissionais dos meus dois estágios, nos quais vivi uma experiência que me proporcionou um crescimento exponencial profissionalmente nesse início de carreira.

Enfim, a todos os que por algum motivo, diretamente ou indiretamente, contribuíram para este trabalho.

## RESUMO

LOPES, Murylo Peliçaro. **Construção de uma plataforma experimental *Ball and Beam* para o ensino de controle automático.** 2019. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

Este trabalho tem como objetivo a modelagem, construção e desenvolvimento de uma plataforma experimental do clássico sistema *Ball and Beam*, sendo de baixo custo e de fácil replicação, para o uso e desenvolvimento de atividades práticas no laboratório de controle da Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Cornélio Procópio. O sistema, é não linear e instável em malha aberta e consiste em uma viga, tendo uma das suas extremidades fixada com um sensor infravermelho que mede a distância da bola e na outra extremidade um eixo que faz relação com um motor DC, o qual irá controlar o ângulo de inclinação da viga, sua subida e descida. Nesta viga, uma esfera desliza facilmente sobre ela. Tem-se, assim, o problema de controle: o equilíbrio da bola em uma posição pré-definida. São apresentados conceitos e a modelagem do sistema, além dos materiais e métodos que foram utilizados para a construção da plataforma, os avanços na construção do protótipo e sua finalização. Por fim, um balanço dos estudos com as dificuldades e melhorias frente ao trabalho.

**Palavras-chave:** Modelagem matemática. *Ball and Beam*. Planta didática.

## ABSTRACT

LOPES, Murylo Pelicaro. **Construction of an experimental Ball and Beam platform for the teaching of automatic control.** 2019. 64 p. Term Paper (Graduation) – Control and Automation Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

This work has the objective of modeling, construction and development of an experimental platform of the classic Ball and Beam system, being of low cost and easy replication, for the use and development of practical activities in the control laboratory of the Federal Technological University of Paraná. The system is non-linear and unstable in open loop and consists of a beam having one end fixed with an infrared sensor that measures the distance of the ball and at the other end an axis that relates to a DC motor, which will control the angle of inclination of the beam, its ascent and descent. In this beam, a ball slide easily over it. We have, therefore, the problem of control: the balance of the ball in a predefined position. Concepts and modeling of the system are presented, in addition to the materials and methods that were used for the construction of the platform, the advances in the construction of the prototype and its finalization. Finally, a balance of studies with the difficulties and improvements to work.

**Keywords:** Mathematical modeling. Ball and Beam. Didactic plant.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2 ANÁLISE DE KITS COMERCIAIS <i>BALL AND BEAM</i>.....</b>	<b>11</b>
<b>3 SISTEMA <i>BALL AND BEAM</i>.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Modelagem do Sistema .....</b>	<b>15</b>
3.1.1 Função Transferência .....	16
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Parte Mecânica .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Parte Elétrica .....</b>	<b>27</b>
4.2.1 Arduino UNO .....	27
4.2.2 Ponte H.....	29
4.2.3 Motor DC com <i>encoder</i> .....	29
4.2.4 Sensor Infravermelho Sharp 2Y0A21 .....	29
<b>4.3 Construção da plataforma.....</b>	<b>30</b>
<b>5 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>32</b>
5.1 Lista de Componentes.....	32
5.2 Material da plataforma.....	33
5.3 Construção Mecânica .....	34
5.4 Modelamento em 3D do sistema.....	35
5.5 Teste e Análises .....	36
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>
<b>ANEXO A – Desenho técnico do sistema.....</b>	<b>49</b>
<b>ANEXO B – Tabela para corte das peças .....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO C – Possíveis códigos fonte para implementação no Arduino .....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO D – Fotos do protótipo .....</b>	<b>62</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Vive-se em constante mudança, onde todo o conhecimento e fluxo de informações são atualizados de forma quase instantânea. Observa-se que a modernidade chegou à educação, seja ela, superior, média ou fundamental. A fim de potencializar seu aprendizado, docentes e discentes buscam novas ferramentas para assimilação do conteúdo aprendido em sala de aula. Cantini et al. (2006) diz que

A escola como um dos espaços mais privilegiados de discussão, produção e construção do conhecimento deve oportunizar aos seus profissionais e estudantes o uso das ferramentas tecnológicas disponíveis no ambiente escolar, visando dinamizar e intensificar o processo de ensino e aprendizagem.

Como facilitadores do processo de ensino e aprendizagem, escolas e universidades já possuem TV, DVD, computadores, projetor de mídia, Internet. É constatado que aulas normais expositivas tem uma assimilação menor do conteúdo, pois as aulas práticas são uma ótima ferramenta de ensino, visto que o ganho e a solidificação do conhecimento são provenientes da interação com aparelhos, experimentações, erros, acertos e socialização.

Isso é comprovado por estudos realizados na área da psicologia. É citado por Veronez (2016) a teoria construtivista de Piaget que considera que o sujeito desenvolve sua capacidade intelectual por processos de assimilação e acomodação a partir da interação com objetos, utilizando seus mecanismos de aprendizagem.

A qualidade do ensino é importante, e esta qualidade pode ser atingida com o método de aprendizagem. E o que melhor elucida a prática com a teoria são os Kits Educacionais, onde o aprender não fica restrito apenas à teoria, mas produz práticas pedagógicas significativas.

Com o conhecimento prévio, o estudante, o pesquisador ou o professor poderão desenvolver e testar suas ideias em plataformas experimentais de forma mais lúdica. A gama de áreas em que pode ser aplicado um Kit educacional vai da engenharia para a áreas da biologia, geografia, física e até no ensino de línguas. Destacam-se, no âmbito da engenharia, os Kits de Robóticas e de Controle, com peças, sensores e atuadores para simulação e prototipagem.

Ramos et al. (2016) destacam a importância e necessidade da utilização de plantas industriais para que os alunos tenham contato com situações próximas ao que enfrentarão na vida profissional. Tratando-se do ensino de controle nas universidades, a aquisição de plantas físicas é complicada, pois muitas das vezes o orçamento é extrapolado, por se tratar de um equipamento comercial e não educacional, o que dificulta a aquisição das mesmas pelas universidades. E como uma alternativa, é buscado o uso e implementação de plataformas experimentais e Kits Educacionais.

Essa busca por novas ferramentas de ensino prático faz despertar ainda mais a curiosidade dos alunos para buscar conhecimento e, frente a isso, até desenvolver novas pesquisas. Outro ponto é a interdisciplinaridade, onde um Kit Educacional pode conter base de conteúdo para as áreas de mecânica, elétrica, informática, física, matemática, automação e programação.

Nesse sentido, esse trabalho de conclusão de curso propõe a construção de uma plataforma experimental do tipo *Ball and Beam* (bola e barra) de baixo custo, a fim de que possa ser replicado e ser de fácil aquisição pelos cursos, onde os professores das disciplinas da área de controle automático possam enriquecer suas aulas através de novas experimentações práticas em laboratórios e que os alunos possam desenvolver um pensamento crítico com base na prática.

Esse sistema/planta é um clássico exemplo que tem como objetivo

[...] manter uma bola, que rola livremente sobre uma barra, numa posição ou trajetória pré-determinada, através do controle automático da inclinação da plataforma. É um sistema que se mostra eficaz para demonstrar os princípios de controle e as vantagens e desvantagens das diferentes topologias existentes. (KLUG, 2015)

A montagem utiliza um microcontrolador Arduino, que pode ser facilmente reprogramado para se usar diferentes controladores e lógicas programáveis. Ainda pode-se projetar um controlador através de modelos da lógica *fuzzy*, conhecida também como difusa ou nebulosa, obtida por várias técnicas que são baseadas na teoria de Lyapunov, em termos de desigualdades matriciais lineares (KHALIL, 2003 apud KLUG, 2015)

Por fim, após estudos das diversas estruturas para tal plataforma, são escolhidos sensores e atuadores que melhor se adequam a esta proposta por ser de baixo custo e de fácil reprodução. Existem diversas técnicas a serem aplicadas e

testadas nessa planta didática. Além da Lógica *Fuzzy*, destaca-se o PID - Controlador Proporcional Integrador Derivativo, a Lógica Reconfigurável, o Controle Neural *Fuzzy*, entre outros. (ROSA, 2015).

Contudo, para esse sistema que está sendo proposto, é aconselhado o PID, que vem de encontro com o tema abordado, pela possibilidade de demonstrar sua ação e a sua aplicabilidade ser mais abrangente, por conta da facilidade de mudança de parâmetros e além de possuir todos os elementos necessários de um sistema de controle, tais como: atuador, sensor, circuito condicionador de sinal, comparador e método de controle. (PALLONE, 2013 apud ROSA, 2015)

Investigam-se, assim, princípios básicos e avançados de controle, incluindo o controle de sistemas naturalmente instáveis. “A característica mais marcante da engenharia de controle talvez seja a oportunidade de controlar máquinas e processos industriais e econômicos para o benefício da sociedade” (DORF, 2013). Os alunos poderão entender as abordagens do sistema com a metodologia de aprender por fazer. Poderão distinguir os efeitos de linearizações, premissas e erros de modelagem devido às diferenças entre simulações e experiências do mundo real. O sistema apresenta graus de incertezas, não linearidade e instabilidades que dificultam e tornam mais interessante o estudo e a análise da dinâmica. (NIRO, 2016)

No estudo da matéria de Controle, alguns professores utilizam este sistema *Ball and Beam* para a educação da teoria clássica de controle. Como exemplo, o ensino do controle de feedback (realimentação) linear, malha aberta e malha fechada, controle de PID, análise de estabilidade baseado no modelo de espaço-estado e até mesmo função de transferência (ZAVALA, YU e LI, 2008). O sistema também é adequado para estudos de pós-graduação para projetar tipos avançados de controle, como controle robusto, controle adaptativo, controle difuso e demais afins.

## 2 ANÁLISE DE KITS COMERCIAIS *BALL AND BEAM*

*Ball and Beam* é um dos modelos mais populares para o ensino de engenharia de sistemas de controle, sendo objeto de artigos de pesquisa (KESHMIRI et al., 2012).

Lobato (2017) coloca muito pontualmente que este sistema “foi por muito tempo um desafio para os pesquisadores na área de controle, pois além de ser instável em malha aberta apresenta uma não linearidade forte para inclinações elevadas”.

Controlar a posição de uma bola, em inglês, *ball*, em uma viga, em inglês, *beam*, é um dos principais problemas da teoria do controle. O aparelho *Ball and Beam* mostra os problemas de controle de sistemas instáveis, por exemplo, um foguete ou míssil durante o lançamento, que precisa de controle ativo para evitar que o míssil seja instável e caia.

Analisando o mercantil, vários kits estão disponíveis no mercado, porém poucos disponíveis para comercialização no Brasil. Os importados têm seu acesso e uso dificultados por terem um custo elevado. E os nacionais nem sempre possuem os recursos de *hardware* e *software* que são necessários para algumas aplicações, conforme cita Miranda et al. (2010) em um artigo que trata da implementação desses recursos em um kit de robótica educacional denominado RoboFácil.

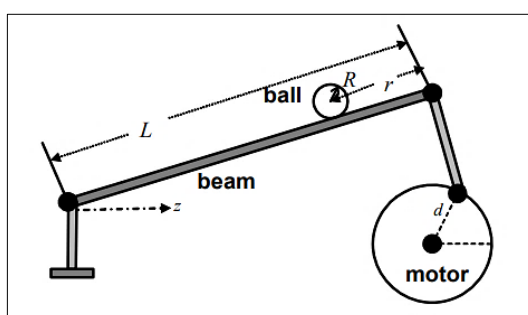
Como observa Niro (2016), esse mecanismo é um recurso didático e vários autores utilizam ou citam estes kits. Sendo assim algumas empresas desenvolveram e comercializam os kits didáticos. Destacam-se a Quanser<sup>®</sup>, Amira<sup>®</sup>, TecEquipment<sup>®</sup>, Balance Control Inc<sup>®</sup>.

São várias plataformas com fins pedagógicos que são compostos por diferentes elementos de *hardware* e de *software*, cada qual com suas peculiaridades e seus valores diversos. Basicamente, a grande maioria consiste em uma viga no qual uma bola pode ser colocada em qualquer posição e se move livremente para frente ou para trás. As variações ocorrem por conta da mudança do sistema de atuação e sensores. Os aparelhos contam com uma bola, seja ela de aço, alumínio ou plástico, que é livre para rolar. Pode-se optar em vez da bola utilizar um cilindro. Por sua vez, na extremidade da viga, é geralmente acoplado um servo motor que gira com um grau de liberdade, onde controla-se o ângulo da viga. Esse servo motor

também pode ser colocado no centro do aparelho. Um ou vários sensores podem medir o ângulo da viga e a posição da bola.

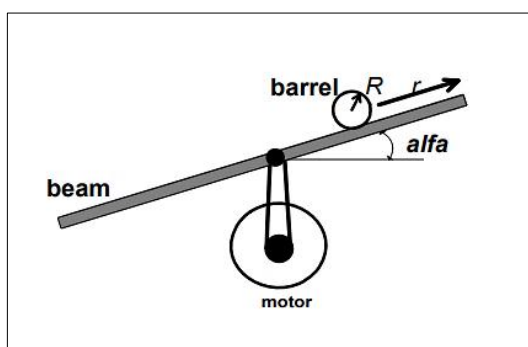
A montagem do sistema pode ser diversa, mas destacam-se duas estruturas. A primeira estrutura, representada na Figura 1, tem o atuador em uma das extremidades e a segunda estrutura, representada na Figura 2, tem o atuador no meio da barra. O efeito é o mesmo, mas o que pode influenciar é a modelagem, complexidade e utilização de controladores e sensores.

**Figura 1 – Sistema *Ball and Beam* com o atuador na extremidade da barra**



Fonte: ZAVALA, YU e LI (2008)

**Figura 2 – Sistema *Ball and Beam* com o atuador no meio da barra**



Fonte: ZAVALA, YU e LI (2008)

Cada método tem seus pontos positivos e negativos. Em alguns trabalhos que foram desenvolvidos a longo de anos, salva-se o problema de controle de um sistema não linear e transpõe na problemática de medição da posição da bola na viga. Uns utilizam métodos ópticos para determinar a posição, outros medem a posição baseando-se na mudança da indutância na presença da bola e outros que utilizam propriedades resistivas de materiais para localizar a bola. (LOBATO, 2017)

Outro grande problema é o ruído na medição, que pode influenciar os valores obtidos pelos sensores e atrapalhar assim o controlador a realizar os cálculos e fazer a atuação na planta, gerando incertezas.

O problema de controle básico é variar o ângulo da viga para controlar a posição da bola. O sistema é um integrador duplo, portanto, é naturalmente instável. Ele precisa de controle de feedback ativo usando métodos de avanço de fase. (LOBATO, 2017)

O sistema mecânico *Ball and Beam* pode ser usado para uma ampla gama de implementações de projeto de sistema de controle automático, através de controladores lineares básicos para métodos não-lineares.

Alguns kits apresentam *software's* de controladores de código aberto, para que os alunos possam modificar e testar seus próprios algoritmos de controle, e os tipos de controladores.

### 3 SISTEMA *BALL AND BEAM*

O sistema físico consiste em uma bola sobre uma viga, cujo o objetivo é controlar e estabilizar a posição pré-determinada (*setpoint*) da bola que pode se deslocar ao longo da barra horizontal através do controle da posição angular do atuador/barra, fato que se assemelha com a dinâmica de sistemas reais no que tange ao movimento do centro de massa, de modo que ao fim dos sucessivos movimentos, a bola seja equilibrada na posição definida. O atuador, neste caso um motor de corrente contínua (DC), levanta ou abaixa uma das extremidades da viga, fazendo assim com que a bola se mova tendo a inclinação da viga controlada através do movimento angular do motor. O problema possui dois graus de liberdade, um de translação da bola, pois esta pode se deslocar linearmente sobre a barra e o outro sendo a variação angular da barra.

Com isso, “o controle é uma tarefa difícil, porque a bola não fica em um só lugar quando a barra é inclinada” (ZAVALA, YU e LI, 2008). Araújo (2012) deduz que “na prática, o equilíbrio da bola sobre a viga é proporcionado devido a sucessivas ações de controle determinadas por um controlador digital, o qual age sobre o sistema baseado no erro entre uma posição de referência e a posição atual da bola”. A esfera pode ser de qualquer material dependendo das características do sensor utilizado. (LOBATO, 2017)

Como um exemplo dessa planta na engenharia cotidiana, pode-se relacionar com a dinâmica de estabilização horizontal de um avião durante o pouso ou até mesmo o fluxo turbulento do ar, permitindo a aplicação de importantes métodos de controle clássico e moderno para compensações dessa planta. (SCALABRIN et al., 2014 apud RAMOS et al., 2016).

É importante salientar que o sistema possui a malha aberta instável e não linear, sendo assim necessário controle por realimentação. “Ele tem uma propriedade muito importante: em malha aberta é instável, porque a saída do sistema (posição da bola) aumenta sem limite para uma entrada fixa (ângulo da barra)” (ZAVALA, YU e LI, 2008).

Assim, para que essa planta funcione corretamente, é imperativo que seja aplicado um sistema em malha fechada, para que a medida da saída, chamada de sinal de retroação/realimentação, possa ser comparada com a resposta desejada. (DORF, 2013)

Sabe-se através de estudos que esta não linearidade depende do desvio angular da barra, pois quando a barra desvia um pequeno ângulo, a partir da posição horizontal, a propriedade não linear não é significativa (WANG, 2007 apud RAMOS, Janito et al, 2016). Nesse caso, é possível linearizar o sistema. No entanto, quando as não linearidades tornam-se significativas, ou seja, o ângulo da barra em relação à horizontal é maior do que 30 graus, uma aproximação linear simples não é precisa. Deste modo, um controle avançado, como a técnica de controle não linear acaba sendo a melhor opção.

É discorrido a seguir o modelo matemático clássico do sistema. O modelo matemático foi obtido partindo de equações conhecidas do *Ball and Beam*. Como observa Ogata (2013), em sistemas mecânicos a principal metodologia utilizada é a segunda lei de Newton adaptada por Euler, podendo ter outra abordagem que seria por Lagrangiana, que utiliza o princípio de Hamilton junto à equação de Lagrange. Niro (2016) conclui em seu trabalho que “esta abordagem facilita o processo de obtenção das equações matemáticas para sistemas complexos já que é uma análise escalar ao contrário do método de Newton que é vetorial”.

### **3.1 Modelagem do Sistema**

A modelagem matemática de qualquer sistema fornece as formas de estudo científico e compreensão do funcionamento e comportamento do sistema. O modelo deve ser complexo suficiente para representar o sistema para que se possa analisar todas as variáveis que estão envolvidas no processo. A complexidade da modelagem, no entanto, eleva o tempo de processamento e de resolução. (NIRO, 2016)

Como é exposto por Chang et. al (2013) apud Klug (2015), para obtenção do modelo matemático considera-se que a bola rola sem deslizamento e que o atrito entre a viga e a bola é desprezível.

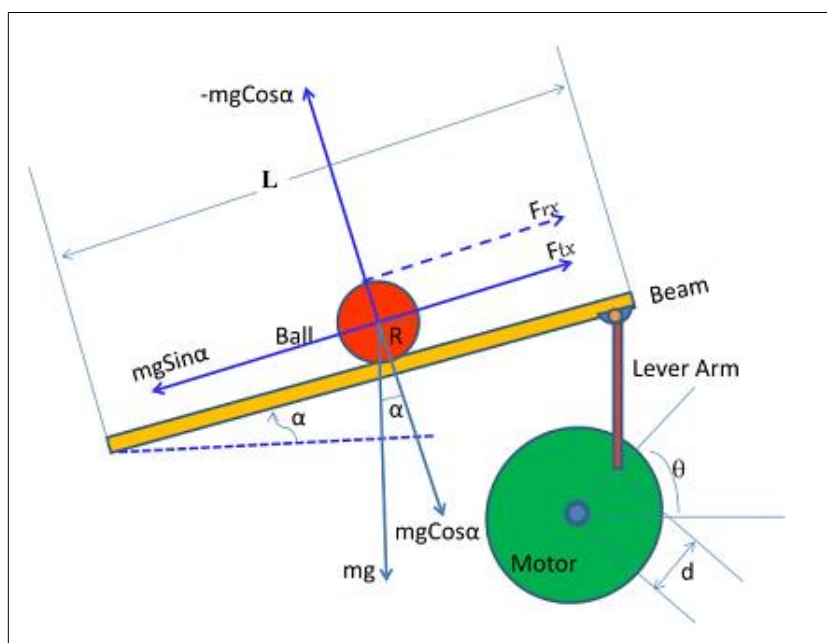
Do ponto de vista do controle, é essencial desenvolver a equação de movimento e a função de transferência do sistema. Esta modelagem é baseada em ANAND e PRASAD (2017).



### 3.1.1 Função Transferência

A função de transferência de qualquer sistema é definida como “a proporção de transformação de saída e a transformada de Laplace”, considerando condições iniciais nulas. Usando o Método Newtoniano de equilíbrio de forças, todos os fenômenos físicos são reduzidos ao movimento de partículas materiais que são causadas por sua atração mútua, ou seja, a força da gravidade. O esquemático de corpo livre é mostrado na Figura 3.

**Figura 3 – Sistema *Ball and Beam* no Método Newtoniano**



**Fonte: ANAND e PRASAD (2017)**

A equação do movimento pode ser derivada usando Mecânica Newtoniana ou Método Lagrange, obtendo assim, a função de transferência das equações do sistema. A modelagem matemática do sistema requer a relação entre a posição da bola e o ângulo de inclinação da viga, além da relação entre a tensão elétrica de entrada e o ângulo de rotação do motor DC.

Assim, a função de transferência pode ser obtida como a combinação de funções de transferência de subsistemas, ou seja:

- (i) inclinação para posicionar a bola e
- (ii) tensão de entrada do motor e seu ângulo de rotação, e o ângulo de inclinação da viga.

A fim de derivar a relação entre a posição da bola e o ângulo da viga considera-se novamente a Figura 3, em que posição da bola em qualquer instante de tempo é  $x$  e a inclinação da viga é considerada ao longo do eixo  $x$ . O movimento da bola na viga é translacional e rotacional. A aceleração de translação da bola é  $\ddot{x}$  no qual a força  $F$  é dada por

$$F_{tx} = m\ddot{x} = m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (1)$$

onde  $m$  é a massa da bola.

O torque rotacional  $T$  da bola é igual a

$$T = J \frac{d\omega}{dt},$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular e  $J$  é o momento de inércia da bola, tendo assim a força rotacional como

$$F_{rx} = \frac{T}{R} = \frac{J}{R^2} \ddot{x},$$

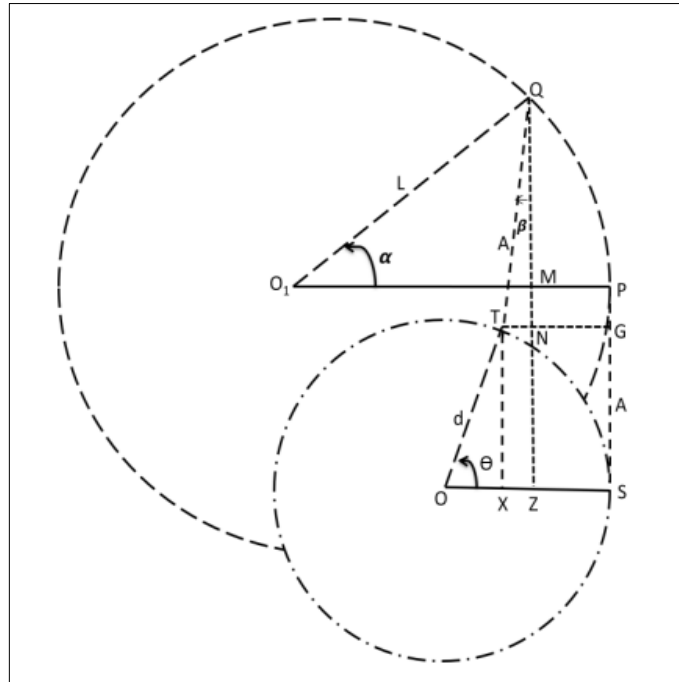
onde  $R$  é o raio da bola.

Ainda com base na Figura 3, tem-se que

$$\begin{aligned} F_{rx} + F_{tx} &= -mg\text{sen}(\alpha). \\ \left(\frac{J}{R^2} + m\right) \ddot{x} &= -mg\text{sen}(\alpha). \end{aligned} \quad (2)$$

Agora, a inclinação da viga é controlada por ângulo de rotação do disco de engrenagem conectado ao motor DC. O braço levanta ou abaixa a viga de acordo com o valor de  $\theta$  como mostrado na Figura 3. Uma simples maneira de obter a relação entre  $\alpha$  e  $\theta$  é usando a geometria da seção do braço da alavanca como mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Relação entre o ângulo do motor e o ângulo da viga



Fonte: ANAND e PRASAD (2017)

A partir desse diagrama, sabe-se que a subida e descida da viga é correspondente as suas rotações acerca de  $O_1$ , referente a rotação do motor em  $O$ . A viga está conectada em  $P$  por mecanismo de alavanca, consistindo em  $SP = A$  e  $OS = d$ . O motor produz uma rotação em  $OS$  e uma mudança vertical no braço  $SP$  que se move de acordo com a viga  $O_1P$ . A relação entre deslocamento angular  $\theta$  em  $OS$  e a deflexão correspondente  $\alpha$  na viga é necessário. O braço do motor  $OS$  atinge  $T$  e termina  $P$  de movimentos da viga para  $Q$ , tendo  $\angle SOT = \theta$  e  $\angle PO_1Q = \alpha$ . Desta maneira,

$$OX = d \cos \theta; TX = d \sin \theta.$$

$$XS = OS - OX = d(1 - \cos \theta).$$

$$O_1M = L \cos \alpha; QM = L \sin \alpha; MP = L(1 - \cos \alpha).$$

$$TN = A \sin \beta; QN = A \cos \beta; MN = A \cos \beta - L \sin \alpha.$$

$$TX = PS - PG = MZ - MN.$$

$$\Rightarrow d \sin \theta = A - A \cos \beta + L \sin \alpha.$$

$$\Rightarrow d \sin \theta - A(1 - \cos \beta) - L \sin \alpha = 0.$$

$$\Rightarrow L \sin \alpha = d \sin \theta - A(1 - \cos \beta).$$

$$\Rightarrow \alpha = \arcsen \left[ \frac{d}{L} \sin \theta - \frac{A}{L} (1 - \cos \beta) \right]. \quad (3)$$

Agora,

$$\begin{aligned}
 TN + NG &= XS. \\
 A \operatorname{sen} \beta + MP &= XS. \\
 A \operatorname{sen} \beta + (L - L \cos \alpha) &= d - d \cos \theta. \\
 A \operatorname{sen} \beta &= d (1 - \cos \theta) - L (1 - \cos \alpha). \tag{4}
 \end{aligned}$$

A solução geral para  $\alpha$  e  $\beta$  é complexa. No entanto, sob restrição que a dependência de  $\beta$  em  $\alpha$  é muito fraca, ou seja,

$$\text{para } \forall \alpha \Rightarrow \cos \beta \simeq 1.$$

$$\text{para } \forall \beta \Rightarrow \cos \alpha \simeq 1.$$

De (3) e (4) podemos obter

$$A \operatorname{sen} \beta = d (1 - \cos \theta).$$

$$\beta = \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left[ \frac{d}{A} (1 - \cos \theta) \right]. \tag{5}$$

$$\alpha \approx \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left[ \frac{d}{L} \sin \theta \right]. \tag{6}$$

Para  $\theta$  pequeno, temos

$$\alpha \approx \frac{d}{L} \theta. \tag{7}$$

Derivando-se as equações (5) e (6)

$$\dot{\beta} = \frac{\frac{d}{A} \operatorname{sen} \theta}{\sqrt{1 - \frac{d^2}{L^2} (1 - \cos \theta)^2}} \dot{\theta}$$

e

$$\dot{\alpha} = \frac{\frac{d}{L} \cos \theta}{\sqrt{1 - \frac{d^2}{L^2} (\operatorname{sen} \theta)^2}} \dot{\theta}.$$

O ângulo da viga é proporcional ao ângulo do motor, que por sua vez é proporcional à tensão de entrada, como será demonstrado na sequência. Das equações (2) e (7), obtemos a equação linearizada

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right)\ddot{x} = -mg\frac{d}{L}\theta.$$

Tomando a transformação de Laplace de ambos os lados assumindo condição inicial zero:

$$\begin{aligned}\left(\frac{J}{R^2} + m\right)s^2X(s) &= -mg\frac{d}{L}\theta(s). \\ \frac{X(s)}{\theta(s)} = G_B(s) &= \frac{-mgd}{\left(\frac{J}{R^2} + m\right)L} \cdot \frac{1}{s^2}\end{aligned}\quad (8)$$

Observa-se que a função de transferência é um integrador duplo e, portanto, oferece um problema de controle um pouco mais complexo. Sabe-se que o momento de inércia da bola é  $J = \frac{2}{5}mR^2$ .

Assim, a função de transferência  $G_B(s)$  pode ser determinada por

$$G_B(s) = \frac{X(s)}{\theta(s)} = -K\left(\frac{1}{s^2}\right)\quad (9)$$

onde a constante  $K = 7\frac{d}{L}$ .

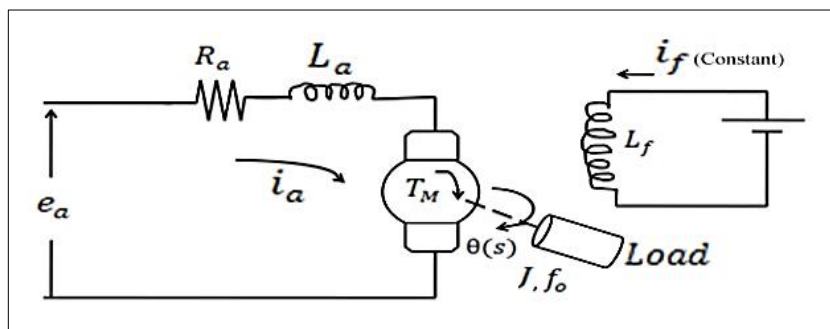
Uma vez que o ângulo  $\alpha$  de inclinação da viga é controlado pela o ângulo do motor  $\theta$ , sendo esse controlado pela tensão de entrada, a função de transferência do motor também é essencial para estabelecer a relação entre  $\theta$  e a tensão de entrada. O motor DC ligado na extremidade da viga altera a inclinação da mesma que, por sua vez, controla o movimento de bola sobre a viga.

Conforme discutido anteriormente, o ângulo de inclinação  $\alpha$  e rotação angular  $\theta$  do motor estão relacionados na equação (7). O ângulo de rotação do motor é decidido pela tensão de entrada  $E_a(s)$  conforme Figura 5. Ainda observando a Figura 5, o motor DC pode ser controlado pela corrente em campo ou pela corrente da armadura, sendo essa a considerada, pois nesta, a posição do eixo e a

velocidade são controladas pela corrente da armadura e a corrente de campo é mantida constante. Os parâmetros são:

- $R_a$ : resistência de armadura;
- $L_a$ : indutância de armadura;
- $T_M$ : torque produzido pelo motor;
- $\theta$ : deslocamento angular do eixo do motor;
- $J = (J_m + J_L)$ : equivalente M1 do motor e carga;
- $f_0$ : coeficiente de atrito viscoso do motor e carga que atua sobre o eixo do motor.

Figura 5 - Diagrama do circuito da armadura do motor DC controlado



Fonte: ANAND e PRASAD (2017)

A tensão de armadura aplicada  $e_a = e_a(t)$  e a corrente na armadura  $i_a = i_a(t)$ , produz o torque  $T_m$  pelo motor que é proporcional ao fluxo do entreferro  $\phi$  e a corrente na armadura  $i_a$ , que pode ser dada por

$$T_M = k_1 \phi i_a = k_1 k_f i_f i_a = k_T i_a,$$

onde  $k_1$  e  $k_f$  são constantes e  $k_T$  é conhecido como constante do motor.

Aplicando a lei de tensão de Kirchhoff, onde “a soma das quedas de potencial ao longo de uma malha fechada é zero” tem-se

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = e_a, \quad (10)$$

onde  $e_b$  é a força contra eletromotriz produzida pela rotação da armadura no campo magnético e é proporcional à velocidade do motor

$$e_b = k_b \frac{d\theta}{dt}, \quad (11)$$

onde  $k_b$  é a constante da força contra eletromotriz.

O torque  $T_m$  desenvolvido pelo motor é utilizado para girar a carga e contra as forças viscosas. Assim, a equação de torque é dada por

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f_0 \frac{d\theta}{dt} = T_M = k_T i_a. \quad (12)$$

Aplicam-se transformações de Laplace, assumindo a condição inicial zero das equações (10), (11) e (12), obtemos

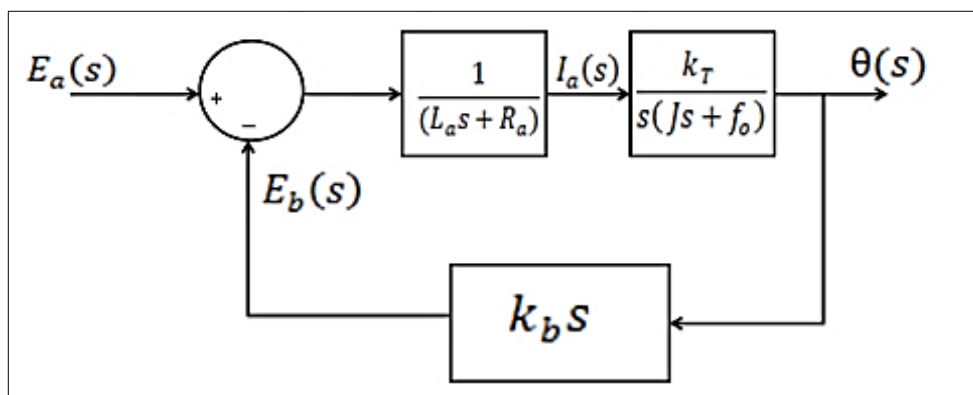
$$(L_a s + R_a) I_a(s) = E_a(s) - E_b(s). \quad (13)$$

$$E_b(s) = k_b s \theta(s).$$

$$(J s^2 + f_0 s) \theta(s) = k_T I_a(s).$$

Essas equações podem ser usadas para representar o diagrama de blocos do motor como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de Blocos do Motor DC



Fonte: ANAND e PRASAD (2017)

Na equação (12) colocando  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ , obtém-se

$$J \frac{d\omega}{dt} + f_0 \omega = k_T i_a. \quad (14)$$

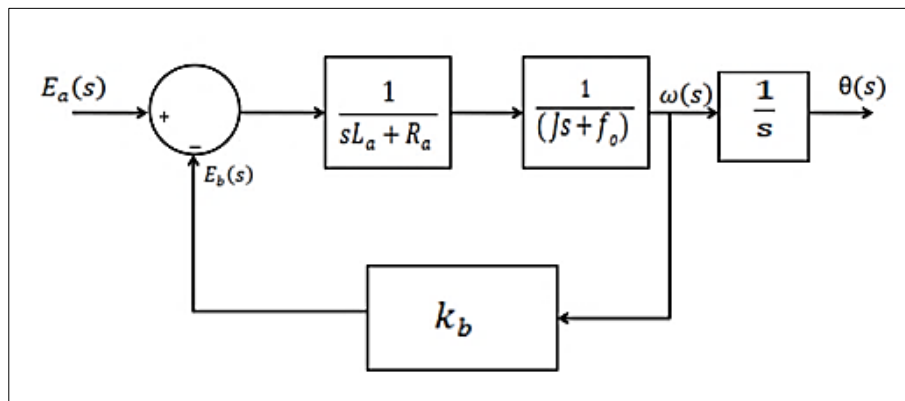
Aplicando a transformada de Laplace,

$$\begin{aligned} Js\omega(s) + f_0\omega(s) &= k_T I_a(s). \\ (Js + f_0)\omega(s) &= k_T I_a(s). \\ \omega(s) &= \frac{k_T I_a(s)}{(Js + f_0)}, \end{aligned} \quad (15)$$

ou seja, a posição  $\theta(s)$  do eixo no diagrama de blocos é obtido integrando-se  $\frac{k_T I_a(s)}{(Js + f_0)}$ .

O diagrama de blocos pode ser modificado para a Figura 7.

**Figura 7 - Diagrama de Blocos do Motor DC modificado**



Fonte: ANAND e PRASAD (2017)

É interessante notar que o motor DC é um sistema aberto de *loop* (laço), mas o diagrama de blocos na Figura 7 mostra que ele mantém um loop de feedback incorporado para a parte final da força contra eletromotriz. No entanto, a realimentação é tomada como o atrito elétrico que é proporcional a taxa negativa de mudança de posição  $\theta(s)$  do motor. A realimentação melhora a estabilidade do motor. A função de transferência do diagrama de blocos da Figura 7 é dada por

$$G_m(s) = \frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{k_T}{s^3 J L_a + (R_a J + f_0 L_a) s^2 + f_0 R_a s + k_T k_b s}.$$



$L_a$  é muito pequeno, podendo ser desprezado:

$$G_m(s) = \frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{k_T}{s(JsR_a + f_0R_a + k_Tk_b)}$$

$$G_m(s) = \frac{k_T/R_a}{s(Js + f)}, \quad (16)$$

onde  $f = f_0 + \frac{k_Tk_b}{R_a}$ .

O aparecimento do termo  $k_b$  em  $f = f_0 + \frac{k_Tk_b}{R_a}$  mostra que a realimentação melhora a fricção viscosa e assim o atrito elétrico. A equação (16) pode ser reescrita como

$$G_m(s) = \frac{k_T/R_a f}{s(\frac{J}{f}s + 1)} = \frac{k_m}{s(\tau s + 1)}, \quad (17)$$

onde  $k_m = k_T/R_a f$  é a constante de ganho do motor e  $\tau = \frac{J}{f}$  é a constante de tempo do motor.

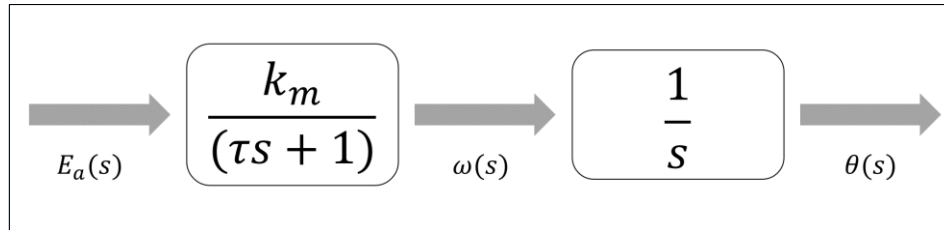
Além disso, pode ser demonstrado que  $k_T = k_b$  em um sistema dimensional, sendo o metro, quilograma e segundo, adotados como unidades das grandezas fundamentais. Também, a função de transferência para a velocidade pode ser dada por

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{k_m}{(\tau s + 1)}, \quad (18)$$

onde  $k_m$  e  $\tau$  são ganhos e constantes de tempo, dependendo dos parâmetros do motor, como resistência da armadura, força contra eletromotriz, momento de inércia.

Assim, o diagrama de blocos simplificado do motor é dado na Figura 8.

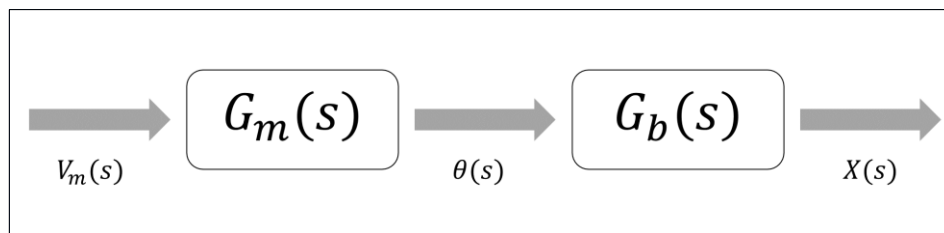
**Figura 8 - Diagrama de blocos simplificado do motor DC**



Fonte: Autoria Própria baseado em ANAND e PRASAD (2017)

Este diagrama de blocos demonstra que o motor DC é um dispositivo integrador. No sistema servo, este motor de corrente contínua é ligado à carga através do sistema de engrenagens e um sensor. A função transferência de malha aberta  $G(s)$  geral da bola-viga pode ser obtida através da combinação de função transferência de seus subsistemas  $G_m(s)$  e  $G_b(s)$ . O diagrama de blocos do sistema *Ball and Beam* é dado na Figura 9.

**Figura 9 - Função Transferência do sistema *Ball and Beam***



Fonte: Autoria Própria baseado em ANAND e PRASAD (2017)

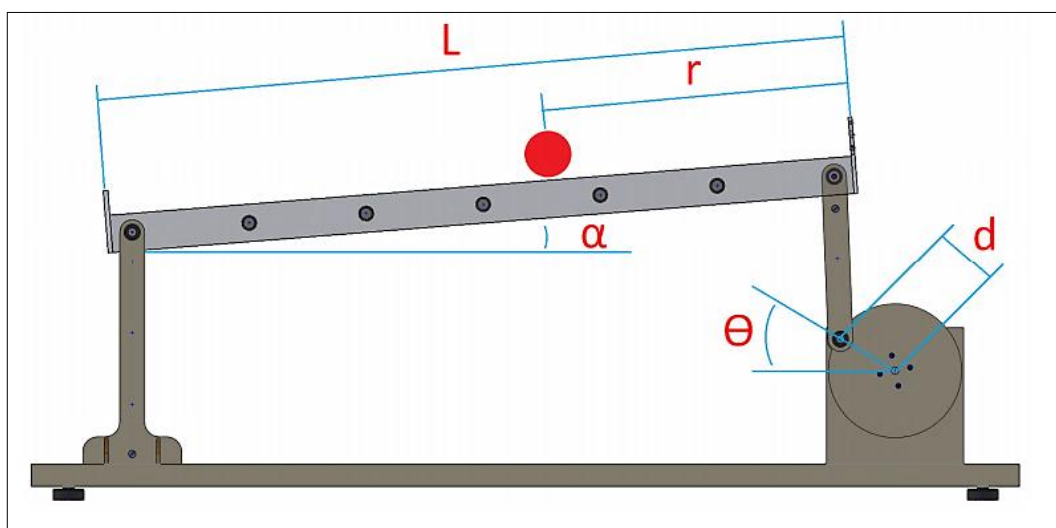
A função de transferência global  $G(s)$  do *Ball and Beam* é dado por

$$G(s) = G_m(s) \cdot G_B(s) = \frac{X(s)}{V_m(s)} = \frac{K_m K}{s^3(1 + \tau s)}. \quad (19)$$

Na modelagem abordada em Lisboa et. al (2005) apud Klug (2015), as variáveis são as mesmas, porém com o esquema ilustrado na Figura 10, pode-se compreender melhor como as variáveis são influenciadas no sistema *Ball and Beam*. No esquemático são definidas as variáveis e constantes do sistema que será trabalhado, sendo:

- $(m)$  – massa da bola
- $(R)$  – raio da bola
- $(d)$  – deslocamento da alavanca
- $(g)$  – aceleração gravitacional
- $(L)$  – comprimento da barra
- $(J)$  – momento de inércia da bola
- $(r)$  – posição da bola
- $(\alpha)$  – ângulo da barra
- $(\theta)$  – ângulo da engrenagem

Figura 10 – Esquemático dos parâmetros para o modelo matemático.



Fonte: KLUG (2015)

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

São divididos em duas áreas: a parte mecânica, com o desenho e materiais a serem utilizados e a parte elétrica, com os sensores, atuadores, controlador. Por fim, é descrito a construção da plataforma e como os componentes se relacionam.

### 4.1 Parte Mecânica

A plataforma de controle é baseada e idealizada com base no trabalho desenvolvido por Klug (2015), onde o mesmo, para a construção do projeto mecânico utilizou o *software* CAD 3D SolidWorks para dimensionar cada componente. O desenho 3D final é apresentado na Figura 11.

As estruturas necessárias para a construção da plataforma, juntamente do material que é feito estão numeradas e apresentadas na tabela 1.

<b>Tabela 1 – Estruturas e Materiais utilizados para a construção mecânica</b>		
<b>Estrutura</b>	<b>Material</b>	<b>Número</b>
Base da estrutura	Fórmica de MDF	1
Guia para a bola	Acrílico	2
Suporte fixo e caixa do motor	Acrílico	3
Disco acoplado no motor	Acrílico	4
Biela	Acrílico	5
Rolamento	Aço	6
Parafusos	Aço	7

Fonte: Autoria própria baseado em KLUG (2015)

### 4.2 Parte Elétrica

Em cada seção é discorrido uma breve introdução de cada componente utilizado na plataforma *Ball and Beam* e a justificativa de escolha.

#### 4.2.1 Arduino UNO

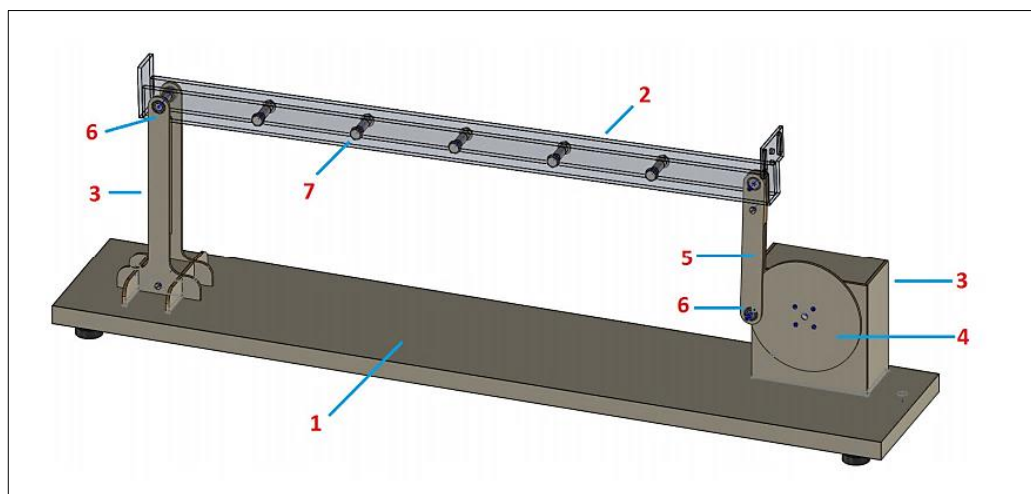
O controlador que será utilizado será o microcontrolador Arduino, uma plataforma de prototipagem eletrônica, que a grosso modo são computadores

embutidos em circuitos integrados. A placa foi criada na Itália em 2005, pelo professor Massimo Banzi, junto com David Cuartielles, um pesquisador visitante da Universidade de Malmö, na Suécia, que buscavam uma solução alternativa de um microcontrolador frente aos produtos caros e difíceis de utilizar da época. Baseado na linguagem C/C++, com funções e bibliotecas próprias e customizadas, sendo o seu *software* e seu *hardware open source*, ou seja, de código aberto e de fácil utilização, há vários códigos, bibliotecas e artigos na internet. É possível desenvolver vários artefatos e projetos através da utilização de componentes simples, como LEDs, até outros mais complexos como sensores e motores. (DILLY, 2015) (ARDUINO, 2017).

Seus programas são chamados de *sketch*, ou seja, o arquivo que contém as linhas de códigos de instrução que são compiladas, enviadas e executadas em uma placa Arduino através do *software* próprio do Arduino, conhecido como IDE (*Integrated Development Environment*, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado).

Das diversas versões e modelos de Arduino, foi escolhido o Arduino UNO: que é uma placa baseada no microcontrolador ATmega328. Ele possui 14 pinos de entrada/saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação uma conexão ICSP e um botão de *reset*. A Placa Arduino Uno é muito indicada para aprender e começar a criar seus projetos eletrônicos com programação. É uma placa robusta, utilizada mundialmente e conta com uma rica documentação complementar, além de uma grande compatibilidade com *shields*.

Figura 11 - Desenho 3D da plataforma *Ball and Beam*



Fonte: KLUG (2015)

#### 4.2.2 Ponte H

Para que o circuito PWM tenha potência suficiente para acionar o motor DC é selecionado o Driver Motor Ponte H L298N que é dedicado para controle de motor DC (*Direct Current*), ou em português, motor CC (Corrente Contínua), sendo que nestes motores a velocidade é regulada e variada com base na tensão aplicada. A relação é relativamente linear, tornando o controle de velocidade e cálculos bem mais simples. O mesmo possui dois canais e permite controlar velocidade e sentido de rotação de até dois motores ao mesmo tempo.

Além de fornecer para os motores a corrente necessária, a Ponte H pode inverter o sentido de rotação do motor através dos comandos lógicos TTL. Além disso, o L298N permite controlar a velocidade, de motores DC, através de sinais PWM. (CARDOSO, 2017)

#### 4.2.3 Motor DC com *encoder*

Como atuador, que será a força motriz da planta, o motor DC de 6 volts permite medir com exatidão a distância percorrida pelo motor, já que possui um *encoder* integrado à carcaça, que segundo o Instituto Newton Braga (2017) é “um dispositivo eletromecânico que conta ou reproduz pulsos elétricos a partir do movimento rotacional de seu eixo. Pode ser definido também como um transdutor de posição angular”. Esse tipo de motor com *encoder* permite que você possa calcular, por exemplo, a distância percorrida de um robô, ou ajustar a velocidade do motor de acordo com a leitura de sensores. Será utilizado para controlar a posição angular da barra. O motor DC é necessário para que haja um controle em malha fechada com intuito de controlar a posição angular da viga.

A transmissão da posição angular será através de um braço articulado, sendo que a parte horizontal do braço é paralela à viga. Logo a posição angular do motor é a mesma da viga. (NIRO, 2016)

#### 4.2.4 Sensor Infravermelho Sharp 2Y0A21

Como sensor, que fará a coleta de informações e dados, será utilizado o Sensor Infravermelho Sharp Longo Alcance GP2Y0A21YK0F que é capaz de medir

distâncias de 10 a 80 cm, uma alternativa frente a sensores ultrassônicos ou sensores infravermelhos que possuem um alcance menor, pois este possui uma boa faixa de medição. Observa-se que este sensor tem um modelo semelhante 2Y0A02, porém este é para longas distâncias, de 20 a 150 cm, o qual não se aplica a este projeto. Sua saída é um valor de tensão analógico emitido que corresponde à distância de detecção, o que facilita a leitura usando o Arduino.

É uma combinação integrada de PSD (detector sensitivo de posição), IRED (Diodo Emissor de Infravermelho) e circuito processador de sinal. Por não ser um sensor linear, é necessário fazer uma conversão para ter os valores de leitura em cm.

Considerado os problemas causados por ruídos na medição, opta-se por esse sensor, pois a variância da reflexividade do objeto, a temperatura ambiente e a duração operacional não influenciam facilmente na detecção da distância desse sensor por adotar o método de triangulação, que determina a distância de um objeto a partir do ângulo de incidência da luz refletida pelo objeto.

### **4.3 Construção da plataforma**

Para a construção da estrutura física, utiliza-se duas barras de acrílico postas em paralelo por onde rolará a bola. Optou-se por controlar a plataforma *Ball and Beam* através de um controlador embarcado, que neste caso é a placa microcontrolada Arduino UNO, junto com a sua IDE para a programação e recepção de dados do mesmo.

O Arduino é responsável por fazer o controle e recepção da leitura da posição da bola, advinda do sensor infravermelho, sendo a medida de saída do sensor, analógico. Com a programação do Arduino, a saída analógica do sensor será convertida para valores de leitura em cm.

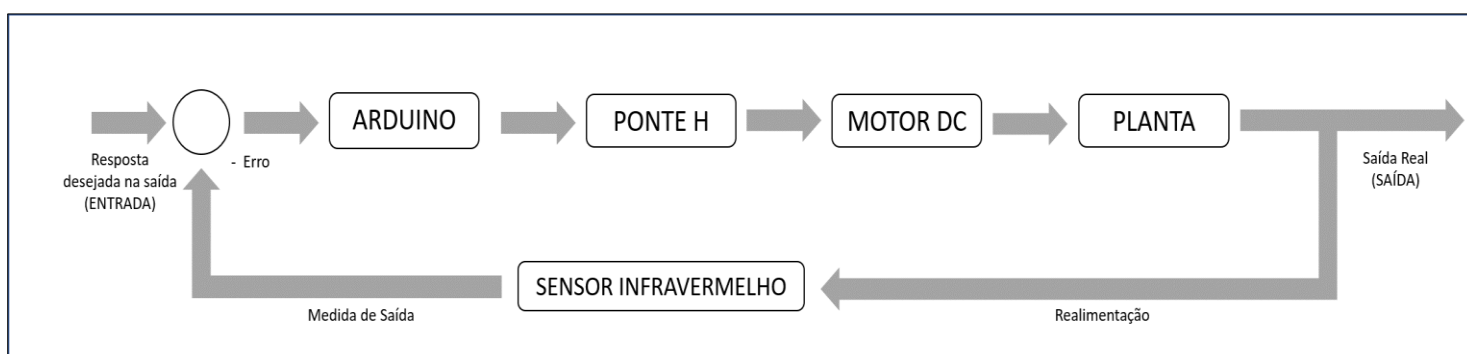
Juntamente com a resposta desejada na saída, que é a posição da bola, será feita a subtração dos valores e será conhecido o erro do sistema de controle. Este será repassado para o Arduino, para o controle, onde o esforço de controle estará na ponte H, que por sua vez está conectado com o motor DC.

Com esses dados, é feito o ajuste do ângulo da barra, que gerará uma saída real e realimentará o sensor infravermelho para uma nova medição. O motor DC funciona como atuador e será colocado em uma das extremidades da viga. Na

outra extremidade encontra-se o sensor infravermelho que monitora a posição da bola.

O objetivo é zerar ou deixar mais próximo do zero o erro, que significará que o sistema chegou ao seu objetivo, ou seja, a posição da bola desejada na viga. Segue um diagrama de blocos, apresentado na Figura 12, ilustrando o sistema de controle com os componentes utilizados, o controlador, o sensor, o processo e o atuador.

**Figura 12 - Sistema de controle com os componentes a serem utilizados**



**Fonte: Autoria Própria**



## 5 DESENVOLVIMENTO

Conforme bem observado por Ramos et al. (2016), o projeto de um *Ball and Beam* consiste em quatro diferentes subsistemas: medição, atuação, controle e protótipo mecânico:

- No sistema de medição, a capacidade de mensurar a posição da bola e enviar esse sinal para o controlador, funcionalidade do Sensor Infravermelho Sharp.

- No sistema de atuação, a capacidade de alterar o ângulo da barra de acordo com o sinal enviado pelo controlador, funcionalidade do Motor DC e da Ponte H.

- No sistema de controle, a capacidade de receber os sinais enviados pelo sistema de medição, analisá-los, tratá-los e a partir disso calcular a ação de controle necessária para corrigir a posição da bola, além de enviar esse ângulo para o sistema de atuação, funcionalidade do Arduino UNO.

- No sistema mecânico, consiste em uma barra, uma bola, um braço de alavanca e outros componentes adicionais.

### 5.1 Lista de Componentes

Para a construção elétrica e de controle do sistema *Ball and Beam* tem-se como necessário o mínimo dos componentes listados na tabela 2. É apresentado os valores de cada componente elétrico/eletrônico para figurar os custos da construção da plataforma. Tomou-se como premissa na escolha dos componentes a sua facilidade de aquisição no mercado, preço, características funcionais e disponibilidade dos mesmos pelo laboratório da universidade.

Orçamento realizado nos sites da UsinaInfo e FilipeFlop no dia 07 de abril de 2019. A disponibilidade e os preços podem ter sido reajustados.

**Tabela 2 – Componentes com os valores de mercado e um possível fornecedor sem o frete.**

Componente	Valor	Fornecedor
Arduino UNO	R\$ 54,90	FilipeFlop
Driver Motor Ponte H L298N	R\$ 19,90	FilipeFlop
Motor DC 6 volts com encoder	R\$ 99,90	FilipeFlop
Sensor Infravermelho Sharp Longo Alcance GP2Y0A21YK0F	R\$ 49,80	UsinaInfo
Protoboard 830 pontos	R\$ 18,90	UsinaInfo

**Fonte: Autoria Própria**

## 5.2 Material da plataforma

O acrílico foi utilizado na implementação da estrutura mecânica para dar maior visibilidade da parte mecânica do sistema. Com isto, pode-se visualizar o motor, o controlador, as ligações elétricas e mecânicas do protótipo.

O acrílico, por se um material mais maleável de se trabalhar e realizar os cortes por conta de fornecedores, foi a primeira opção de material para a construção do protótipo, porém comparado com metais, preocupou-se que o acrílico poderia quebrar ou rachar facilmente. Contudo, utilizando um acrílico de maior espessura e de qualidade, esse problema pode ser sanado. Para tanto o acrílico também atende a necessidade de a viga ser leve, que permita que a bola deslize e que seja capaz de sustentar o sensor e afins.

Um fornecedor chegou a sugerir o uso de Policarbonato para reduzir os custos, ora que uma justificativa é que o policarbonato é mais resistente e faz com que o fogo não se propague. Esse material é indicado para placas de proteção, serviços que não necessitam de muitos detalhes estéticos, mas falando em estética o acrílico se sobressai.

Ainda assim, focado na diminuição do custo, tendo a ideia de fazer o protótipo todo em acrílico, a base da plataforma foi alterada para Fórmica de MDF, pois um acrílico de maior espessura (8 ou 10 mm) tem uma disponibilidade comercial mais baixa e isso eleva o seu preço. Pontua-se também, que o acrílico de 4mm é comercial, o corte pode ser feito a laser, dependendo do fornecedor, o que garante uma precisão maior, e de fácil disponibilidade.

Foi solicitado orçamento para dois fornecedores distintos que trabalham com acrílico na cidade de Joinville – SC e um que trabalha com MDF. O custo e prazo de entrega foram analisados. Os fornecedores tinham um prazo de entrega semelhante.

É apresentado, a seguir, na tabela 3 os orçamentos realizados e os diversos cenários para construção do protótipo:

**Tabela 3 – Orçamento das empresas de acrílico de Joinville - SC.**

Cenários	Empresa	Material	Valor (R\$)
1	Valmor Artes	Base Retangular 800x320mm em MDF 9mm	28,00
2	3D Acrílicos	Acrílico Cristal 4 mm sem a base	55,57
3	Truff	Acrílico Cristal/Preto 4 mm sem a base	60,00
4	3D Acrílicos	Polycarbonato Cristal 4 mm sem a base	76,77
5	3D Acrílicos	Polycarbonato Cristal 4 mm e base de 8 mm	198,74
6	Truff	Acrílico Cristal 4 mm e base Acrílico Cristal 6 mm	215,00
7	3D Acrílicos	Acrílico Cristal 4 mm e base Acrílico Preto 8 mm	220,74
8	Truff	Acrílico Cristal 4 mm e base Acrílico Preto 8 mm	336,00

Fonte: Aatoria Própria

Fazendo a análise de *Inicial Costs*, optou-se por fazer a combinação dos cenários 1 e 2. Os demais foram declinados por conta dos custos.

### 5.3 Construção Mecânica

Uma bola de pingue-pongue foi escolhida devido à baixa inércia e disponibilidade da mesma no mercado.

É importante salientar que as dimensões do protótipo desse trabalho foram baseadas no Sistema *Ball and Beam* da QUANSER e de KLUG (2015). Na tabela 4 mostram-se as medidas para construção do protótipo, onde são comparados as especificações técnicas de um protótipo a ser construído e de um protótipo real.

**Tabela 4 – Comparativo das medidas da construção mecânica.**

Descrição	Dimensões (mm)	
	PRÓPRIO	QUANSER
Base	800 x 320	500 x 225
Espessura da base	9	-
Demais espessuras	4	-
Comprimento da viga	700*	425,5
Comprimento do braço da alavanca	140	120
Comprimento do braço de suporte	180	160
Polia	Ø 13	-
Bola de pingue pongue	Ø 40	Ø 25,4
Massa da bola	0,035 kg	0,064 kg

Fonte: Aatoria Própria

Quanto ao comprimento da viga é feita uma observação: por onde a bola irá rolar são 700 mm. Considera-se 100 mm a mais por conta do sensor infravermelho, sendo este o recuo necessário para uma leitura condizente, o qual será justificado na seção 6.5.

As diferenças de especificações não são justificadas por teoria, mas sim por adaptações observadas durante a construção do protótipo.

#### 5.4 Modelamento em 3D do sistema

De acordo com Souza e Ulbrich (2009) os sistemas CAD (*Computer Aided Design* – Desenhos Assistidos por Computador) são softwares que fornecem uma série de ferramentas para construção de modelos matemáticos de peças e conjuntos. Tais ferramentas podem ser usadas desde a fase de desenvolvimento da peça, na qual uma visualização tridimensional é importante para o usuário, até a fabricação, na qual uma representação bidimensional é suficiente para a fabricação.

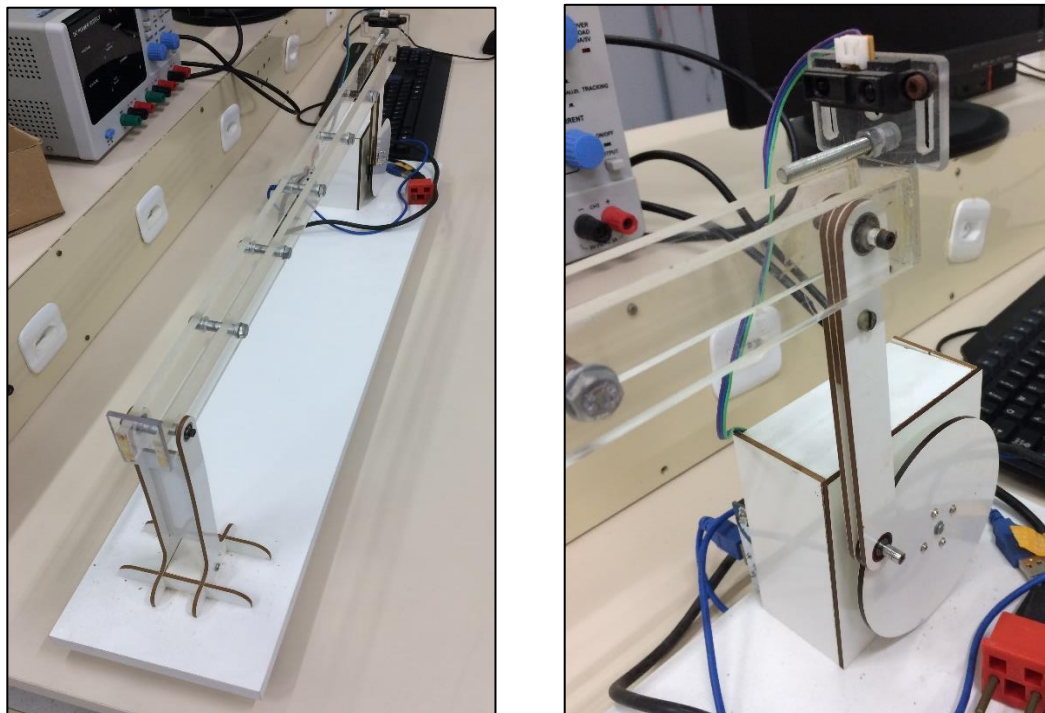
Com base nesses resultados é possível saber se o projeto está otimamente dimensionamento. Com isso pode-se obter uma redução significativa dos custos, pois se evita a fabricação de protótipos desnecessários e retrabalhos indesejados na fase de fabricação do projeto.

Após o modelamento 3D de todas as peças e conjuntos envolvidos no protótipo, inicia-se o detalhamento 2D. Essa etapa tem como objetivo gerar a documentação que serve como interface entre projeto e fabricação. Ela fornece as informações necessárias para que o fornecedor possa fabricar o produto, seguindo-se normas técnicas, assim, o projeto poderá ser interpretado e fabricado de maneira independente pelo o fornecedor. O desenho técnico bidimensional e tridimensional encontra-se no anexo A.

É importante ressaltar, que no decorrer do desenvolvimento do protótipo, o aluno teve contato com uma de suas referências bibliográficas, o professor Michael KLUG, do IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina, campus Joinville. KLUG proporcionou um *feedback* importante do trabalho que o mesmo desenvolveu em 2012. Este trabalho era um projeto de turma de uma matéria ministrada por ele. O aluno pôde ver o protótipo que foi construído, assim, conseguiu sanar algumas dúvidas e teve uma melhor noção do dimensionamento para o seu próprio projeto e

as melhorias necessárias. O protótipo de KLUG foi construído com MDF e algumas partes em acrílico. Nas Figuras 13 e 14, algumas imagens do protótipo de KLUG:

**Figuras 13 e 14 – Protótipo em que foi baseado o estudo**



**Fonte: Autoria Própria**

Foi feita uma listagem de todas as peças que precisariam ser fabricadas, especificando-se: número (para auxiliar na identificação das peças), nome, quantidade, espessura e cor. Segue-se no anexo B. A escolha dos fornecedores e os cenários escolhidos já foram discutidos na seção 6.2.

### **5.5 Teste e Análises**

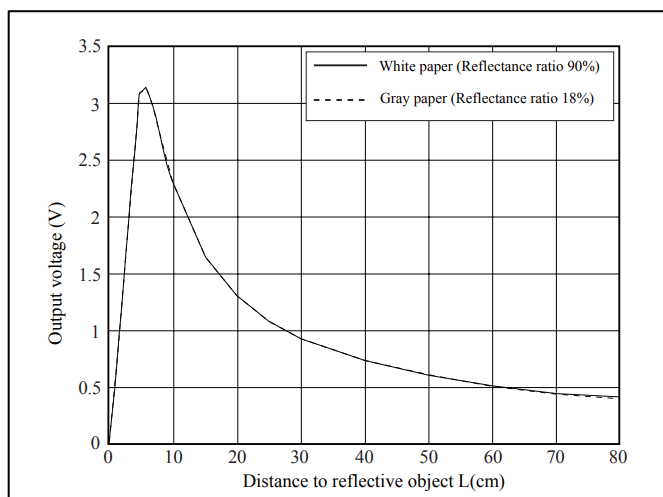
Foram realizados testes separados para cada componente, com o objetivo de entender o funcionamento dos mesmos e como eles se comportavam. Nesses testes, houve esquemáticos e algoritmos próprios para cada componente. Logo, para chegar ao algoritmo final do controlador Arduino é feita a junção desses códigos adaptados para o sistema que está se trabalhando.

É observado que quando a bola rola na viga, a tensão detectada pela o sensor infravermelho faz com que seja determinada a localização da bola. É definido uma posição padrão, que no caso é o meio da barra. É feita uma calibração no

sensor para conhecer a máxima distância que a bola pode atingir ao deslizar sobre a barra. Esta distância máxima é extremo oposto de onde se encontra o sensor infravermelho. É feito o mesmo para conhecer a menor distância, porém, neste caso é colocado o mais próximo possível do sensor e que seja possível fazer a leitura. Encontrado o máximo e mínimo é definido a posição padrão, que será a média desses valores, o qual será a posição central da bolinha, sendo esta a posição de desejo.

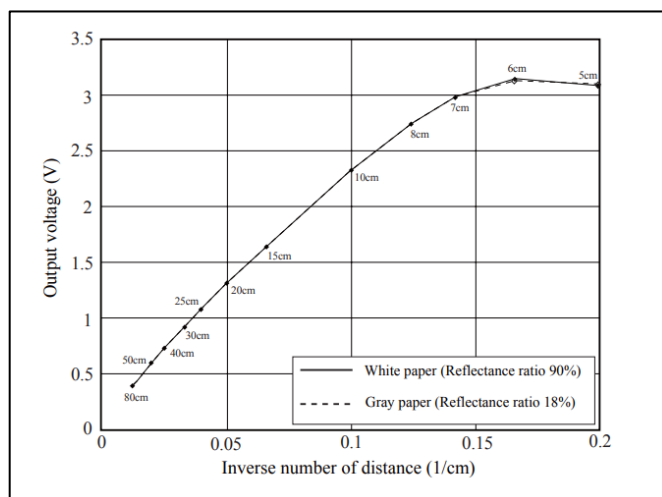
O sensor de distância tem uma saída analógica e é importante observar o comportamento da tensão de saída desse sensor em função da distância entre este e a bola. Observa-se os gráficos 01 e 02 onde pode-se estimar uma equação.

**Gráfico 1 - Tensão de saída (V) x Distância do objeto refletido L(cm)**



Fonte: *Datasheet Sharp GP2Y0A21YK0F*

**Gráfico 2 - Valor inverso da distância (1/cm) x Tensão de saída (V)**



Fonte: *Datasheet Sharp GP2Y0A21YK0F*

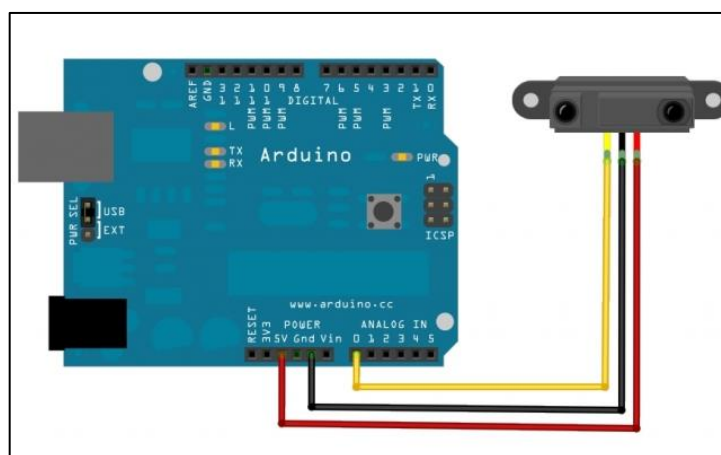
Observa-se que o pico de tensão do sensor se refere as menores distâncias (0 a 10 cm). Sendo assim, conforme a tensão vai diminuindo, a distância vai aumentando. O sinal analógico tem variação de tensão proporcional à distância. O comportamento da tensão de saída do referido sensor possui um comportamento não linear. Para valores menores que 10 cm pode haver uma leitura não muito precisa. Com a leitura analógica do sensor, pode-se calcular, através do controlador a distância em cm, através de uma equação.

Tendo 5V de referência, vinda da alimentação do Arduino, sabe-se que a resolução é de 10 bits ( $2^{10} = 1024$ ), logo  $5/1024 = 0,0048828125$ . É deduzida, assim, uma equação pela análise dos gráficos do *datasheet*, o qual é apresentado no anexo C, onde é apresentado um código para exemplo.

Liga-se o fio vermelho em uma porta de 5V, o fio preto é ligado no GND (*Ground* – Terra) e o amarelo é o sinal analógico sendo ligado em uma porta pré-definida no algoritmo do controlador, que no caso é a porta analógica A0 do Arduino.

No teste individual foi usado o seguinte esquemático apresentado na Figura 15. Foi montado no Fritzing, que é um software *open source* que ajuda a modelar circuitos que utilizam Arduino ou demais controladores.

**Figura 15 - Esquemático de montagem do sensor**



**Fonte: Autoria Própria (2019)**

Já o motor DC com encoder embutido permite que se possa calcular a distância percorrida ou ajustar a velocidade do motor de acordo com a leitura de sensor. Há uma pequena placa na parte de trás onde estão instalados os dois sensores que irão ler as informações relativas à rotação do motor.

Essa placa tem um conector com 6 pinos, onde liga-se:

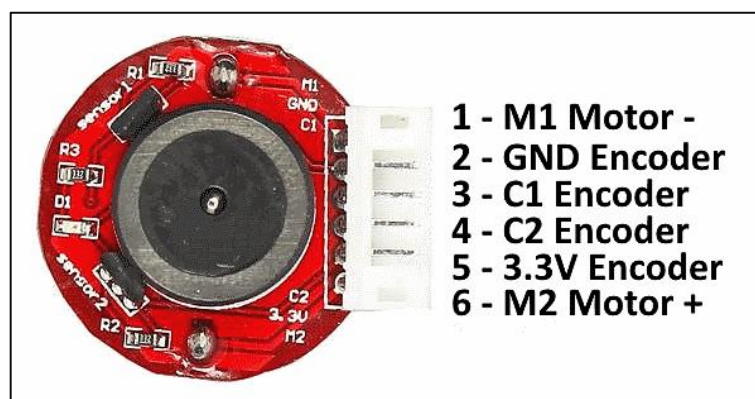
- A alimentação do motor (pinos M- e M+), que foram ligados no OUT3 e OUT4 da ponte H, respectivamente;

- A alimentação dos sensores do encoder (GND e 3.3V), ligados nos canais correspondentes no Arduino;

- O sinal de saída, nos pinos C1 (canal A do encoder) e C2 (canal B do encoder). Precisam-se de dois pinos do Arduino para ler as informações dos sensores do encoder. O pino C1 será ligado ao pino digital 2 do Arduino e o pino C2 será ligado ao pino digital 4.

Segue-se a Figura 16 retirada do site Arduino & Cia:

**Figura 16 – Ligações do conector do encoder**



Fonte: Arduino & Cia (2019)

Como esse motor exige mais corrente do que a suportada pelos pinos do Arduino, utiliza-se no circuito um módulo ponte H L298N o qual controla o sentido de rotação do motor.

Os pinos 6 e 7 controlam o sentido de rotação do motor: sentido horário (pino 6 HIGH e pino 7 LOW), ligado no IN3 da Ponte H; sentido anti-horário (pino 6 LOW e pino 7 HIGH), ligado no IN4 da Ponte H.

Sabendo como controlar o sentido de rotação do motor, tem-se que controlar a velocidade do mesmo. Sendo assim, controlar a velocidade de um motor DC usando o Driver Motor com Ponte H L298n juntamente do Arduino.

Segundo Cardoso (2017) “um motor DC gira baseado em campos magnéticos gerados pela corrente que passa em suas bobinas. Para variar a velocidade do motor podemos alterar essa corrente que é diretamente proporcional a tensão sobre elas.”



Encontra-se a solução utilizando o conceito do PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso) que é uma técnica para obter resultados analógicos por meios digitais.

Essa técnica consiste na geração de uma onda quadrada em uma frequência muito alta em que pode ser controlada a porcentagem do tempo em que a onda permanece em nível lógico alto. Esse tempo é chamado de *Duty Cycle* (Ciclo de trabalho) e sua alteração provoca mudança no valor médio da onda, indo desde 0V (0% de *Duty Cycle*) a 5V (100% de *Duty Cycle*) no caso do Arduino.

O valor do *Duty Cycle* usado pelo Arduino é um inteiro armazenado em 8 bits, de forma que seu valor vai de 0 (0%) a 255 (100%). Tem-se a seguinte formulação:

$$\mathbf{Duty\ Cycle\ (\%)\ =\ (x/x + y) * 100\% = (x/T) * 100\%}$$

$$\mathbf{Vmédio = Vmáx * Duty\ Cycle(\%)}$$

Para este projeto, considera-se 25% da velocidade total, pois leva-se em conta a rotação da polia e da estabilização da bolinha, o qual não pode rodar muito abruptamente e por muito tempo. Para um sinal PWM, temos que se 255 é 100%, 25% é aproximadamente 64. Como a tensão máxima de saída do Arduino é 5V a tensão média do sinal PWM será:

$$\mathbf{Vmédio = Vmax * Duty\ Cycle(\%)}$$

$$\mathbf{Vmédio = 5 * 25\%}$$

$$\mathbf{Vmédio = 1,25V}$$

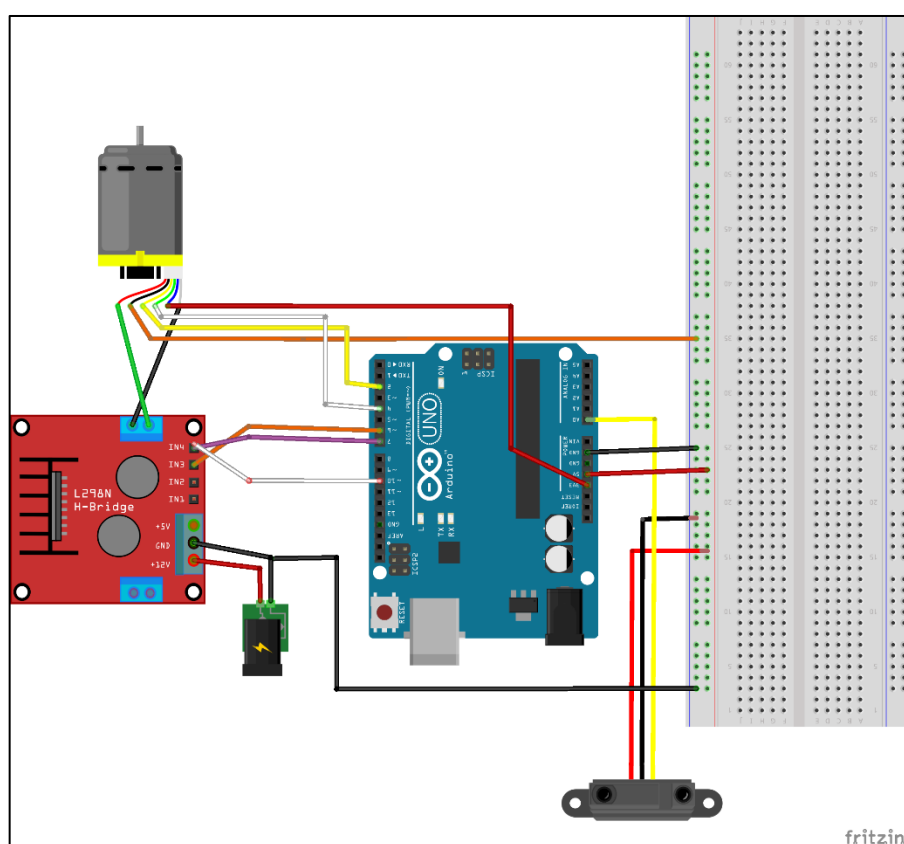
Já na placa, normalmente o *Enable A* e *B* fica em curto com um sinal de 5V da placa através de um jumper. Como irá utilizar uma velocidade controlada, retira-se esse jumper e é inserido um sinal PWM nessa entrada, modulando, assim, a tensão que é enviada para o motor.

Para efeito de comprovação da teoria e comportamento do sistema, foram rascunhados 3 códigos: ON/OFF, com PWM, PID. Os mesmos são só para nortear o trabalho, eles não devem ser considerados pois não houve um ajuste fino. Os códigos se encontram no anexo C.

Conforme já mencionado no trabalho, o acionamento do motor DC é feito por meio de uma ponte H, a qual é ligada em uma fonte de alimentação de tensão, fornecida pelo o laboratório, enquanto que o sinal de controle da ponte H e a aquisição de dados do sensor é realizado por um microcontrolador, neste caso um Arduino UNO.

Na Figura 17 são apresentadas as ligações finais dos componentes: controlador, sensor e atuador, ilustrado de uma maneira didática no Fritzing:

**Figura 17 - Esquemático final dos componentes integrados**



Fonte: Autoria Própria (2019)

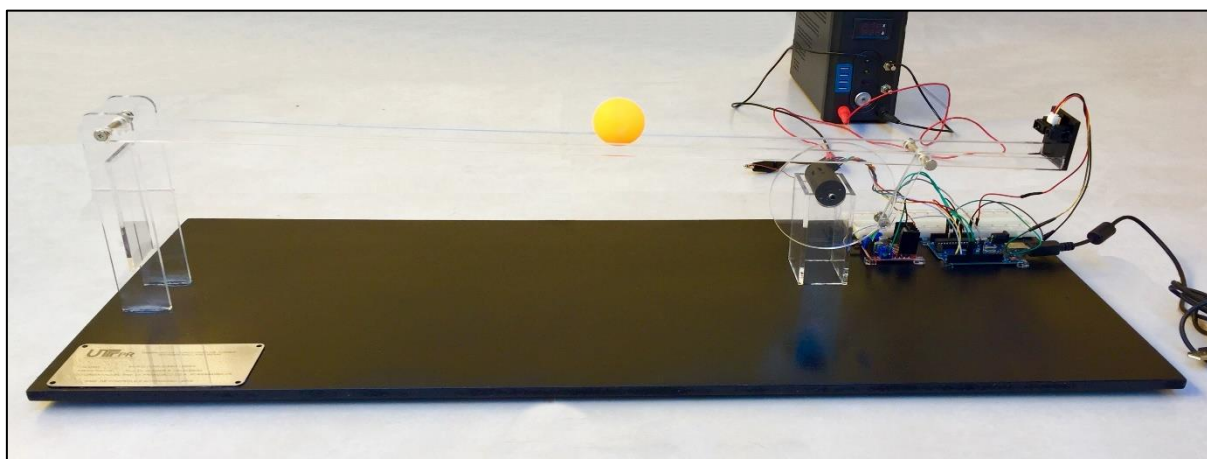
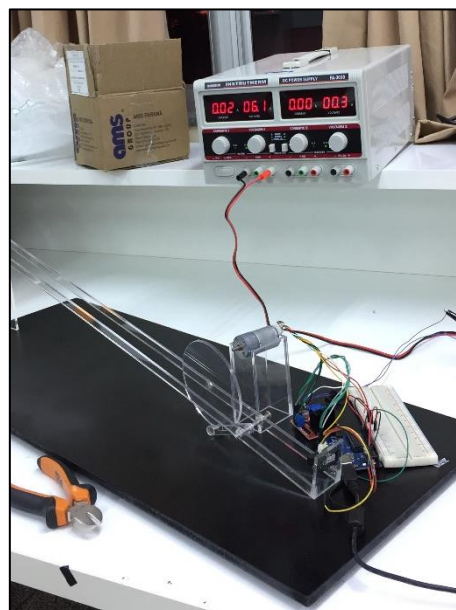
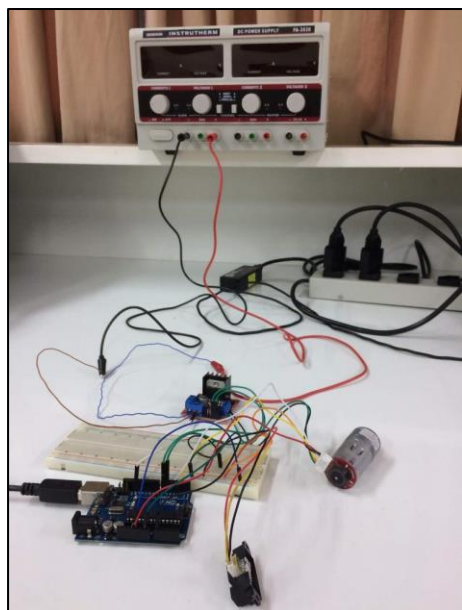
Esse sistema real finalizado foi idealizado para possíveis melhorias na plataforma, pois foi incluído um protoboard para introdução de novos componentes. O aluno/pesquisador pode manipular os fios para novas portas de I/O e assim realizar diversos testes.

Prosseguindo com o projeto, foi realizado o *try-out* ou testes de aceitação/validação, termo conhecido na empresa onde o aluno fez estágio, que tem por objetivo alinhar a máquina e os parâmetros. Sendo assim, após a conclusão da parte mecânica, foi necessário integrar o protótipo à parte eletroeletrônica. Após

todos os testes e ajustes terem sido realizados, iniciou-se a documentação do trabalho.

Nas Figuras 18, 19 e 20, algumas imagens do processo de testes e montagem do protótipo no laboratório de controle e por fim o protótipo finalizado.

**Figuras 18, 19 e 20 – Montagem iniciais e montagem final já com a base e o protótipo finalizado respectivamente**



**Fonte: Autoria Própria (2018 e 2019)**

Quanto ao planejamento financeiro, houve um auxílio da universidade do edital de apoio à execução de TCC. Abaixo foi realizado estimativas dos gastos reais, para prever qual seria o custo total do projeto.

E por fim no anexo D temos todas as fotos do protótipo finalizado e na tabela 5, em uma visão macro, o custo total do protótipo:

**Tabela 5 – Overview dos custos do projeto.**

<b>Custos</b>	<b>Valor</b>
Projeto Elétrico	R\$ 243,40
Projeto Mecânico	R\$ 83,57
Acabamento	R\$ 45,00
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 371,97</b>

**Fonte: Autoria Própria**

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho de conclusão de curso foi apresentado a construção de uma plataforma experimental para o ensino de controle do tipo *Ball and Beam*. Observou-se, via modelagem e em aplicação prática, que os objetivos inicialmente propostos estão condizentes com os resultados obtidos. Os componentes para o uso de controle funcionam corretamente, permitindo interatividade com o usuário. Desta forma, os alunos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná podem agora usufruir de uma planta real do sistema *Ball and Beam*, para testes dos controladores estudados em teoria.

Desse modo, o sistema *Ball and Beam* aqui apresentado proporciona um grande potencial para o ensino e aprendizado de controle. Dá-se ainda relevância pelo o estudo de instrumentação e controle em tempo real, a possibilidade de implementação controladores variados e aprimoramento do sistema. Será disponibilizado todos os estudos e códigos para os professores orientador e coorientador para aplicação e possíveis melhorias dos mesmos.

Nesta direção, Ramos et al. (2016) apresenta outras propostas a serem aplicadas no protótipo a fim de controlar o sistema físico, como exemplo: Modelagem aprofundada do sistema em estudo; estudo, projeto e implementação de um controlador; Simulação numérica no Simulink; Ensaios experimentais. Pontua-se também uma possível integração com o software MatLab, para realização de simulação de controladores

Como futuras melhorias, inclui-se uma possível alteração de sensoriamento (sensores ultrassônicos, resistivos, magnéticos, entre outros). Sugestão de fazer um sensoriamento por tensão, sendo assim, seria colocado um condutor por toda a viga e a bola metálica, a qual fecharia o circuito com a tensão aplicada nos terminais. Assim, quanto maior/menor a perda de tensão, poder-se-ia deduzir a distância. Diminuir o comprimento da barra, pois isso causou interferências na leitura da distância máxima pelo o sensor.

De fato, o objetivo deste trabalho foi alcançado que foi a construção e desenvolvimento de uma plataforma experimental do clássico sistema *Ball and Beam*, sendo de baixo custo, pois o protótipo ficou com um custo bem abaixo de um plataforma importada, e é de fácil replicação, devido a toda documentação gerada, códigos, estudos, matérias e componentes utilizados. E a plataforma é doada para a

Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Cornélio Procópio, para que alunos/pesquisadores utilizem para o desenvolvimento de atividades práticas e validações no laboratório de controle.

## REFERÊNCIAS

- ANAND, Santosh; PRASAD, Rajkishore. **Dynamics and Control of Ball and Beam System**. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. IJRITCC. v. 5, p. 1332-1339, 2017.
- ARAÚJO, Ivanés L. C. et al. **Modelagem, Simulação, Controle e Animação de Sistema “Ball-Beam” utilizando o software MATLAB**. XXXIV Congresso Nacional de Matemática aplicada e computacional. UFPA. CNMAC, Águas de Lindóia, 2012.
- ARDUINO E CIA. Disponível em: [www.arduino.cc.br/2016/10/motor-dc-com-encoder-arduino.html](http://www.arduino.cc.br/2016/10/motor-dc-com-encoder-arduino.html). Acesso em: 15 abril 2019.
- ARDUINO. Disponível em: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc). Acesso em: 25 outubro 2017.
- BAÚ DA ELETRÔNICA. Disponível em: <http://www.baudaeletronica.com.br/arduino-uno-r3.html>. Acesso em: 20 abril 2019.
- CANTINI, M. C. et al. **O desafio do professor frente as novas tecnologias**. p. 875–883, 2006.
- CARDOSO, Daniel. Vida de Silício. **Ponte H L298N - Controlando a velocidade de um motor DC**. Disponível em: [www.portal.vidadesilicio.com.br/ponte-h-l298n-controlando-velocidade-motor](http://www.portal.vidadesilicio.com.br/ponte-h-l298n-controlando-velocidade-motor). Acesso em: 25 outubro 2017.
- CHANG, Y. G.; CHAN, W. S.; CHANG, C. W. **T-S Fuzzy Model-Based Adaptive Dynamic Surface Control for Ball and Beam System**. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, n. 60, p. 2251-2263, 2013.
- DILLY, Rosiene; MENDES, Luiz Felipe Carvalho. **Aplicação em Tempo Real de Monitoramento de Umidade e Temperatura Utilizando Arduino**. Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.
- DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de Controle Modernos**. 12ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 814 p.
- FILIFELOP. Disponível em: [www.filifelep.com](http://www.filifelep.com). Acesso em: 17 junho 2018.
- FRITZING. Disponível em: [www.fritzing.org/home/](http://www.fritzing.org/home/). Acesso em: 09 maio 2018.
- INSTITUTO NEWTON BRAGA. **Como funcionam os encoders**. Disponível em: [www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/5454-mec128](http://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/5454-mec128). Acesso em: 25 outubro 2017.
- KESHMIRI, M. et al. **Modeling and Control of Ball and Beam System Using Model Based and Non-Model Based Control Approaches**. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, v. 5, n. 1, p. 14–35, 2012.
- KHALIL, H. K. **Nonlinear Systems**. Prentice Hall, 2003.
- KLUG, Michael. **Construção e Controle de uma Plataforma Experimental Ball and Beam**. UFSC, Santa Catarina, 2015.

LISBOA, S. N. D. MAITELLI, A. L.; FERNANDES, R. G.; NETO, A. D. D. **Controladores PID e Neural Aplicados a uma Planta *Ball and Beam***. VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São Luís, 2005.

LOBATO, Franciny G. S.; CALDAS, Frank V.; NETO, Milton C. **Desenvolvimento e Modelagem de um sistema "*Beam & Ball*".** IESAM, São Luís, 2017.

MIRANDA, Leonardo Cunha de; SAMPAIO, Fábio Ferrentini; BORGES, José Antonio dos Santos. **RoboFácil: Especificação e Implementação de um Kit de Robótica para a Realidade Educacional Brasileira**. Revista Brasileira de Informática na Educação, v. 18, n. 3, p. 46–58, 2010.

NIRO, Lucas. **Construção, instrumentação e controle de uma bola viga modificado utilizando controle seguidor com realimentação de estados e atribuição de auto estrutura completa em tempo real**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. UTFPR, Cornélio Procópio, 2016. 90 p.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistema de Controle**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª edição. Rio de Janeiro: Prentice Hall, 2013. 809 p.

OLIVEIRA NETTO, A. A. de. **Metodologia da pesquisa científica: guia prático para a apresentação de trabalhos acadêmicos**. 3. ed. rev. e atual. Florianópolis: Visual Books, 2008.

PALLONE, M. F. **Modelagem e Controle PID do sistema "*Ball and Beam*".** Maringá, 2013.

QUANSER. ***Ball and Beam***. Disponível em: <https://www.quanser.com/products/ball-and-beam/#overview>. Acesso em: 28 abril 2018.

RAMOS, Janito et al. **Projeto de um Sistema *Ball and Beam* para o ensino de Controle Automático**. XXI Congresso Brasileiro de Automática, UFES, Vitória, 2016.

ROBOTSHOP. **ACROMA *Mycontrol Ball and Beam Kit***. Disponível em: [www.robotshop.com/ca/en/acrome-mycontrol-ball-beam-kit.html#Supplier-Product-Code](http://www.robotshop.com/ca/en/acrome-mycontrol-ball-beam-kit.html#Supplier-Product-Code). Acesso em: 16 outubro 2017.

ROSA, Guilherme Américo; SALEM, Feres Azevedo. **Modelagem e Controle de um sistema "*Ball and Beam*".** UNICESUMAR, Maringá, 2015.

SCALABRIN, R. et al. **Projeto de controladores robustos  $h_2$  e  $h_\infty$  por realimentação de estados através da abordagem por  $l_m$** , COBENGE, 2014.

SHARP. **Datasheet Sharp GP2Y0A21YK0F**. Disponível em: [www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk\\_e.pdf](http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf). Acesso em: 09 maio 2018.



SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/ CAM/ CNC: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Artliber, 2009. 332 p.

TECQUIPMENT. **Ball and Beam Apparatus**. Disponível em: [www.tecquipment.com/ball-and-beam-apparatus](http://www.tecquipment.com/ball-and-beam-apparatus). Acesso em: 16 outubro 2017.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Curitiba: UTFPR, 2009.

USINAINFO. Disponível em: [www.usinainfo.com.br](http://www.usinainfo.com.br). Acesso em: 17 junho 2018.

VERONEZ, Wanderley Marcílio. **Kits de Robótica Educacional como Ferramenta para Resolução de Problemas**. V Simpósio Nacional de Ensino de Ciência e Tecnologia. UEPG, Ponta Grossa, 2016.

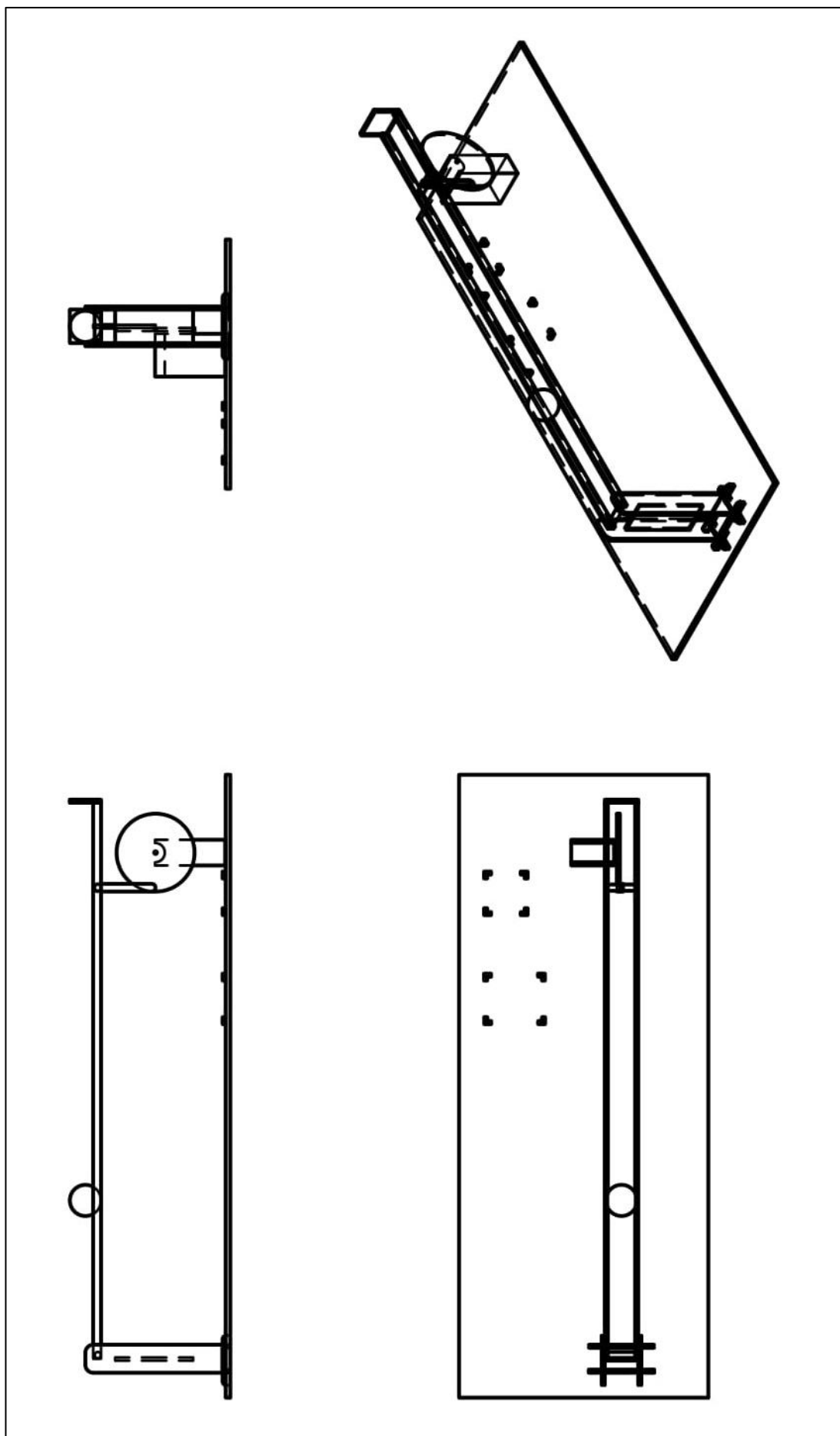
VIDA DE SILÍCIO. Disponível em: [www.portal.vidadesilicio.com.br/ponte-h-l298n-control-velocidade-motor/](http://www.portal.vidadesilicio.com.br/ponte-h-l298n-control-velocidade-motor/). Acesso em: 15 abril 2019.

WANG, W. **Control of a ball and beam system**. School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide. 2007.

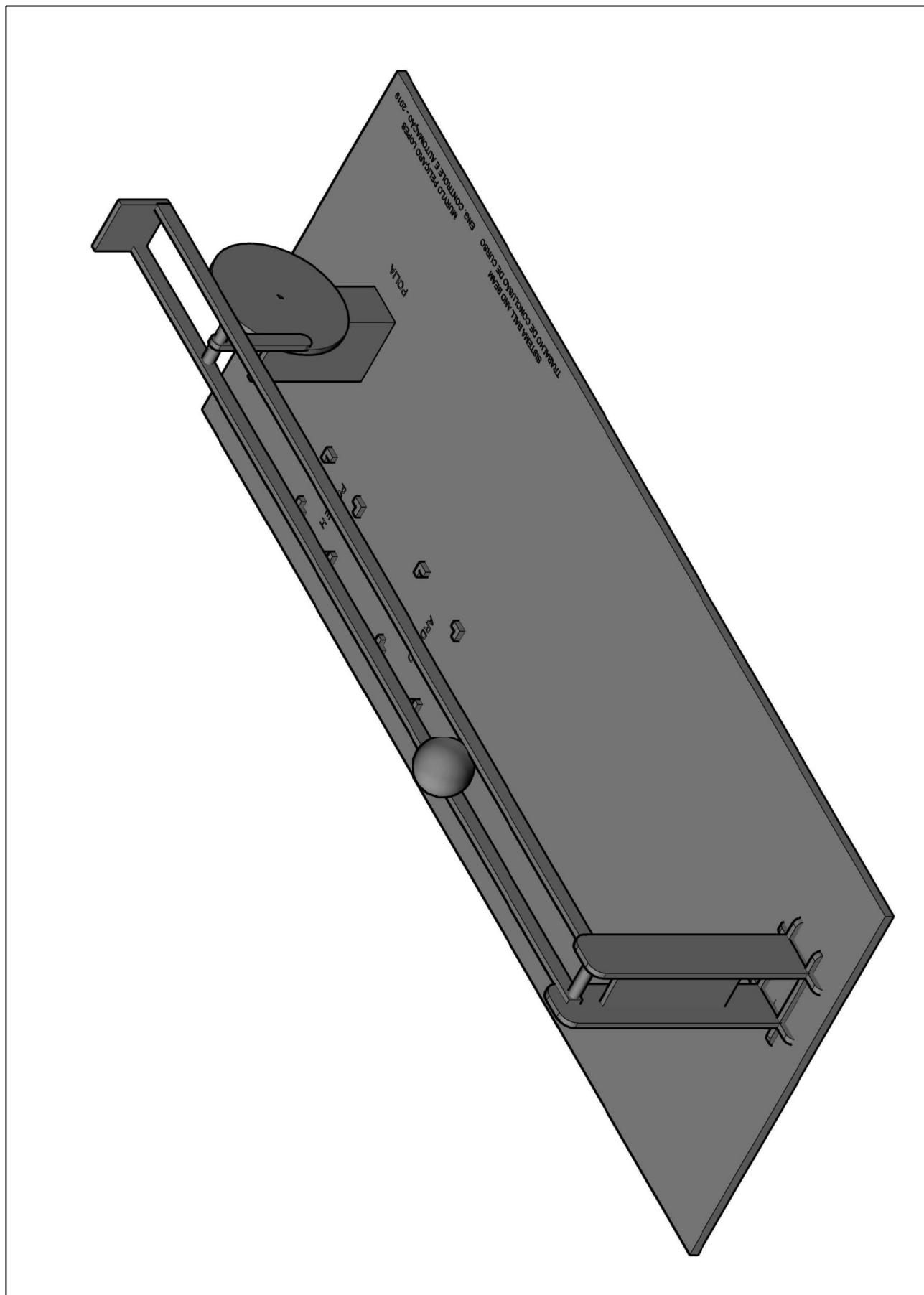
ZAVALA, S. J.; YU, W.; LI, X. **Synchronization of two Ball and Beam systems with neural compensation**. 17º Congresso Mundial da Federação Internacional de Controle Automático. Seul, 2008. Disponível em: [www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ifac2008/data/papers/1624.pdf](http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ifac2008/data/papers/1624.pdf). Acesso em: 26 outubro 2017.

## **ANEXO A – Desenho técnico do sistema**

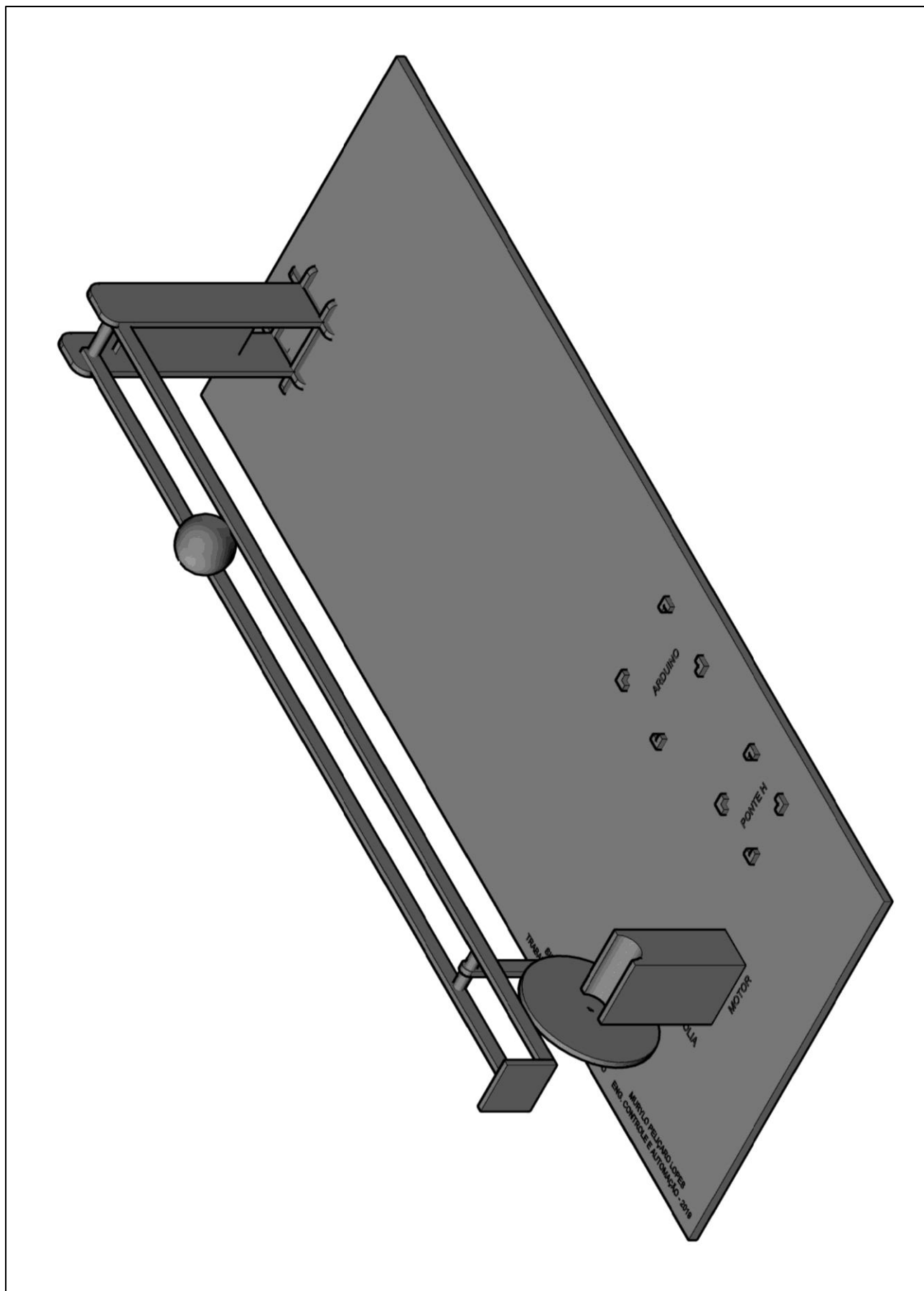
## VISTAS ISOMÉTRICAS



## MODELAGEM 3D – VISTA SUDOESTE - SO



## MODELAGEM 3D – VISTA NORDESTE - NE

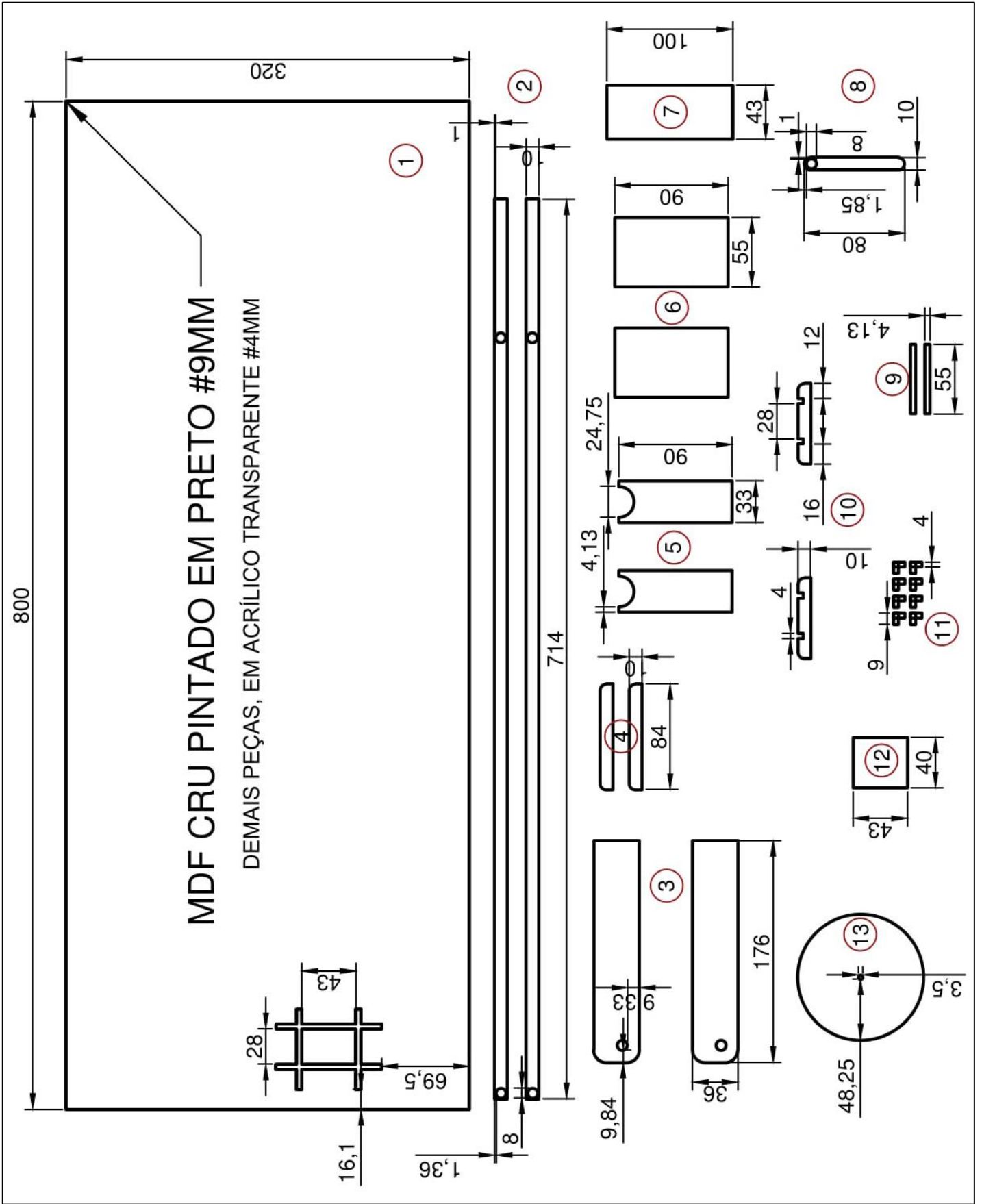


**ANEXO B – Tabela para corte das peças**

Tabela 6 –Especificações para o corte das peças

Nº	Nome da peça	Quantidade	Espessura	Material	Cor
1	Base	1	9 mm	MDF	Pintado em <i>spray</i> de tinta preta e envernizado
2	Viga	2	4 mm	Acrílico	Transparente
3	Colunas de sustentação	2	4 mm	Acrílico	Transparente
4	Cruz da base da coluna	2	4 mm	Acrílico	Transparente
5	Base do motor DC com corte	2	4 mm	Acrílico	Transparente
6	Base do motor DC	2	4 mm	Acrílico	Transparente
7	Entre colunas	1	4 mm	Acrílico	Transparente
8	Alavanca polia/viga	1	4 mm	Acrílico	Transparente
9	Base da coluna	2	4 mm	Acrílico	Transparente
10	Cruz da base da coluna	2	4 mm	Acrílico	Transparente
11	Cantoneiras dos componentes	8	4 mm	Acrílico	Transparente
12	Base para fixação do sensor	1	4 mm	Acrílico	Transparente
13	Polia	1	4 mm	Acrílico	Transparente

Fonte: Autoria Própria





## **ANEXO C – Possíveis códigos fonte para implementação no Arduino**

## CÓDIGO 01 – EXEMPLO DE UM CÓDIGO BÁSICO – ON/OFF

```

/*
 * Desenvolvedor: Murylo Peliçaro Lopes
 * Orientador: Prof. Dr. Kleber Romero Felizardo
 * Co Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Scannavino Junior
 * Criado em Maio de 2018
 * UTFPR-CP
 * TCC - CONSTRUÇÃO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL BALL AND BEAM
 * PARA O ENSINO DE CONTROLE AUTOMÁTICO
 */

//Pinagem do arduino
#define sensor A0 //Sensor Sharp (10 a 80 cm)
boolean Direcao;
int velocidadeB = 10; //Pino do PWM
int velocidade = 64; //Variável auxiliar

//motor_B
int IN3 = 6;
int IN4 = 7;

//Inicializa Pinos
void setup()
{
  pinMode(IN3,OUTPUT);
  pinMode(IN4,OUTPUT);
  pinMode(velocidadeB,OUTPUT);
  pinMode(sensor, INPUT);
  Serial.begin(57600); //Definicao para impressão no serial da IDE
}

void loop()
{
  float volts = analogRead(sensor)*0.0048828125; //calcula tensão de entrada AN
  int distance = 26*(1/volts); //equação de acordo com o gráfico
de datasheet
  Serial.print("Distancia: ");
  Serial.print(distance);
  Serial.println(" cm");

  //Lógica da inversão do sentido dos motores

  if (distance <20 && distance >=10)
  {
    digitalWrite(IN3, HIGH);
    digitalWrite(IN4, LOW);
    Serial.println("Sentido: Anti-horario");
    analogWrite(velocidadeB,velocidade);
    delay(100);
  }

  else if (distance >60 && distance <=80)
  {
    digitalWrite(IN3, LOW);
    digitalWrite(IN4, HIGH);
    Serial.println("Sentido: Horario");
    analogWrite(velocidadeB,velocidade);
    delay(100);
  }

  else //Freia Motor_B
  {
    digitalWrite(IN3,HIGH);
    digitalWrite(IN4,HIGH);
  }

  Serial.println("-----"); }

```

## CÓDIGO 02 – EXEMPLO DE UM CÓDIGO COM PWM

```

/*
 * Desenvolvedor: Murylo Peliçaro Lopes
 * Orientador: Prof. Dr. Kleber Romero Felizardo
 * Co Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Scannavino Junior
 * Criado em Maio de 2018
 * UTFPR-CP
 * TCC - CONSTRUÇÃO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL BALL AND BEAM
 * PARA O ENSINO DE CONTROLE AUTOMÁTICO
 */

//Pinagem do arduino
#define sensor A0 //Sensor Sharp (10 a 80 cm)
boolean Direcao;
byte Encoder_C1Last;
const byte Encoder_C1 = 2;
const byte Encoder_C2 = 4;
int velocidadeB = 10; //Pino do PWM
int velocidade = 64; //Variável auxiliar
int duracao;

//motor_B
int IN3 = 6;
int IN4 = 7;

//Inicializa Pinos
void setup() {
  pinMode(IN3,OUTPUT);
  pinMode(IN4,OUTPUT);
  pinMode(velocidadeB,OUTPUT);
  pinMode(sensor, INPUT);
  Serial.begin(57600); //Definicao para impressão no serial da IDE
  EncoderInit(); //Definicao do encoder
}

void loop() {
  float volts = analogRead(sensor)*0.0048828125; //calcula tensão de entrada AN
  int distance = 26*(1/volts); //equação de acordo com o gráfico de datasheet
  Serial.print("Pulso: "); //impressão no serial
  Serial.println(duracao);
  Serial.print("Distancia: ");
  Serial.print(distance);
  Serial.println(" cm");

  //Lógica da inversão do sentido dos motores
  if (distance < 28){
    digitalWrite(IN3, HIGH);
    digitalWrite(IN4, LOW);
    Serial.println("Sentido: Anti-horario");

    while (velocidade > 0) { //velocidade de 64 a 0
      analogWrite(velocidadeB,velocidade);
      velocidade = velocidade - 5;
      delay(50);
    }
    velocidade = 64; //restaura o valor da variável
  }

  else if (distance > 32) {
    digitalWrite(IN3, LOW);
    digitalWrite(IN4, HIGH);
    Serial.println("Sentido: Horario");

    while (velocidade > 0) { //velocidade de 64 a 0
      analogWrite(velocidadeB,velocidade);
      velocidade = velocidade - 5;
      delay(50);
    }
    velocidade = 64;
  }
}

```

```

else //Freia Motor_B
{
    digitalWrite(IN3,HIGH);
    digitalWrite(IN4,HIGH);
}

Serial.println("-----");
duracao = 0;
}

//Função do enconder
void EncoderInit()
{
    pinMode(Encoder_C2, INPUT);
    attachInterrupt(0, calculapulso, CHANGE);
}

void calculapulso()
{
    int Lstate = digitalRead(Encoder_C1);
    if ((Encoder_C1Last == LOW) && Lstate == HIGH)
    {
        int val = digitalRead(Encoder_C2);
        if (val == LOW && Direcao)
        {
            Direcao = false; //Reverse
        }
        else if (val == HIGH && !Direcao)
        {
            Direcao = true; //Forward
        }
    }
    Encoder_C1Last = Lstate;

    if (!Direcao) duracao++;
    else duracao--;
}

```

## CÓDIGO 03 – EXEMPLO DE UM CÓDIGO RASCUNHADO PARA PID

```

/*
 * Desenvolvedor: Murylo Peliçaro Lopes
 * Orientador: Prof. Dr. Kleber Romero Felizardo
 * Co Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Scannavino Junior
 * Criado em Maio de 2018
 * UTFPR-CP
 * TCC - CONSTRUÇÃO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL BALL AND BEAM
 * PARA O ENSINO DE CONTROLE AUTOMÁTICO
 */

//Pinagem do arduino
#define sensor A0 //Sensor Sharp (10 a 80 cm)
boolean Direcao;
byte Encoder_C1Last;
const byte Encoder_C1 = 2;
const byte Encoder_C2 = 4;
int velocidadeB = 10; //Pino do PWM
int velocidade = 64; //Variável auxiliar
int duracao;

//motor_B
int IN3 = 6;
int IN4 = 7;

//PID
float
kp = 50, //valor da constante proporcional ---> esse valor pode ser alterado
pelo usuario
ki = 0.1, //valor da constante integral ---> esse valor pode ser alterado
pelo usuario
kd = 0.1; //valor da constante derivativa ---> esse valor pode ser alterado
pelo usuario

float
p = 0, //controle proporcional
i = 0, //controle integral
d = 0, //controle derivativo
pid = 0, //controle proporcional, integral e derivativo (PID)
erro, //variável de erro
tdecorrido = 0; //variável que irá receber o tempo decorrido para ocorrer o
loop de controle, sendo 0 como inicio
float setpoint = 23; //o alvo que pode ser alterado pelo usuário

//Inicializa Pinos
void setup()
{
  pinMode(IN3,OUTPUT);
  pinMode(IN4,OUTPUT);
  pinMode(velocidadeB,OUTPUT);
  pinMode(sensor, INPUT);
  Serial.begin(57600); //Definicao para impressão no serial da IDE
  EncoderInit(); //Definicao do encoder
}

void loop()
{
  float volts = analogRead(sensor)*0.0048828125; //calcula tensão de entrada AN
  int distance = 26*(1/volts); //equação de acordo com o gráfico
de datasheet
  erro = setpoint - distance; //calcula a variação entre a
distancia medida e a distancia alvo. Faz parte da realimentação do sistema e no
cálculo de cada controlador.
  float delta = ((millis() - tdecorrido))/1000.0; //calcula a diferença em segundos
entre um loop
  tdecorrido = millis(); //conta quanto tempo levou para
dar um loop
}

```

```

//controle proporcional
p = kp*erro;

//controle integral
i += (ki*erro)*delta;

//controle derivativo
d = erro*kd/delta;

//PID
pid = p+i+d;

Serial.print("Pulso: "); //impressão no serial
Serial.println(duracao);
Serial.print("Distancia: ");
Serial.print(distance);
Serial.println(" cm");
Serial.println("-----");
Serial.println(pid);
digitalWrite(IN3,LOW); //Freia Motor_B
digitalWrite(IN4,LOW);

if(pid!=0){
  //Lógica da inversão do sentido dos motores

  if (distance <22)
  {
    digitalWrite(IN3, HIGH);
    digitalWrite(IN4, LOW);
    Serial.println("Sentido: Anti-horario");
    analogWrite(velocidadeB,velocidade);
    delay(200);  }

  else
  {
    digitalWrite(IN3, LOW);
    digitalWrite(IN4, HIGH);
    Serial.println("Sentido: Horario");
    analogWrite(velocidadeB,velocidade);
    delay(200);  }
}

else{
  digitalWrite(IN3,HIGH); //Freia Motor_B
  digitalWrite(IN4,HIGH);
}
duracao = 0;
}

//Função do enconder
void EncoderInit() {
  pinMode(Encoder_C2, INPUT);
  attachInterrupt(0, calculapulso, CHANGE); }

void calculapulso(){
  int Lstate = digitalRead(Encoder_C1);
  if ((Encoder_C1Last == LOW) && Lstate == HIGH) {
    int val = digitalRead(Encoder_C2);
    if (val == LOW && Direcao) {
      Direcao = false; //Reverse }
    else if (val == HIGH && !Direcao) {
      Direcao = true; //Forward }
    }
  Encoder_C1Last = Lstate;

  if (!Direcao) duracao++;
  else duracao--;
}

```

## **ANEXO D – Fotos do protótipo**

