



**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas
Gerais
Campus Betim**

Vanderson A. Moreira Andrade

Montagem e Controle de Planta Física e Virtual no
MATLAB® para Levitação de Bola por Ar

Betim-MG

2022

Vanderson A. Moreira Andrade

Montagem e Controle de Planta Física e Virtual no
MATLAB® para Levitação de Bola por Ar

Trabalho de conclusão apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Controle e Automação.

Orientador: Prof^o. Dr. Arthur Hermano Rezende Rosa

Betim-MG

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

A554m Andrade, Vanderson Aparecido Moreira
Montagem e controle de planta física e virtual no MATLAB para
levitação de bola por ar / Vanderson Aparecido Moreira Andrade. –
2022.

54 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em
Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim,
2022.

Orientação: prof. Arthur Hermano Rezende Rosa.

1. MATLAB (Programa de computador). 2. Microcontroladores. 3.
Arduino (Controlador programável). 4. Levitação. I. Vanderson
Aparecido Moreira Andrade. II. Título.

CDU: 681.51

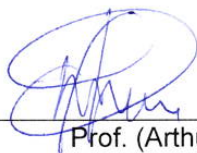
VANDERSON A. MOREIRA ANDRADE

**MONTAGEM E CONTROLE DE PLANTA FÍSICA E VIRTUAL NO
MATLAB PARA LEVITAÇÃO DE BOLA POR AR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Betim como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Betim, 29 de junho de 2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. (Arthur H. Rezende Rosa)
DAUTI – IFMG Campus Betim



Prof. (Leandro Freitas de Abreu)
DAUTI – IFMG Campus Betim



Prof. (Flávia Cordeiro Martins)
DAUTI – IFMG Campus Betim

Dedico meu esforço, para finalizar esse trabalho, ao meu querido pai Osvaldo Coelho de Andrade (in memoriam) que não pôde vivenciar esse momento, mas que enquanto viveu batalhou ao meu lado e também para minha querida mãe Conceição Regina Moreira Andrade que sempre dedicou a sua vida pela felicidade de seus filhos.

Agradecimentos

Inicialmente agradeço a Deus por me guiar nessa trajetória e também ter colocado pessoas que contribuíram para vencer essa jornada. Agradeço a minha família pelo enorme apoio, principalmente minha mãe Conceição Regina Moreira Andrade e minha esposa Letícia Gomes Fernandes Rossi Andrade, sem elas eu não teria conseguido. Não posso esquecer do meu irmão, tias, primos, primas e amigos pela motivação de diversas formas e sempre me colocando como bom exemplo.

Agradeço ao professor, doutor, orientador Arthur Hermano Rezende Rosa, que teve a disponibilidade e boa vontade em me ajudar, muito obrigado pelo carinho e atenção.

Por fim, agradeço a Universidade Federal de Minas Gerais por onde iniciei o caminho e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Betim, por terem me proporcionado essa oportunidade que mudou minha trajetória de vida.

“Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!”

Mario Sergio Cortella

Resumo

Neste trabalho foi realizada a montagem e controle de um protótipo de baixo custo de uma planta para levitação de bola por ar, e também projetado um modelo virtual 3D dessa planta através do MATLAB®), ambos utilizados em atividades práticas de técnicas de controle, da disciplina de laboratório de sistemas de controle, com intuito de despertar a curiosidade dos alunos.

A planta física foi montada com tubos de PVC devido a praticidade, menor custo e tempo de montagem. O controlador foi embarcado em uma placa Arduino Uno e o sensor de posição da bola escolhido foi o ultrassônico. Além da parte de controle PID através do Simulink do MATLAB®).

A criação da planta virtual 3D foi a partir da planta "*Ball and Beam*" existente no *plugin "Virtual Controls Laboratory"*, que usa Simscape juntamente com Mechanics mais o Simulink do MATLAB®).

Para alcançar o objetivo foi feita uma revisão bibliográfica relacionada à planta de levitação de bola por ar, sensor ultrassônico, Arduino, técnicas de controle e MATLAB®, entre outros temas relacionados ao assunto tratado.

Com a planta física e a virtual foi possível fazer simulação usando controle PID e observar a resposta do sistema.

Palavras-chave: Planta levitação por ar, microcontrolador, controlador, PID, Arduino, MATLAB®, Simulink.

Abstract

In this work, the assembly and control of a low-cost prototype of a plant for air ball levitation was carried out, and a 3D virtual model of this plant was projected through MATLAB®[®], both used in practical activities of control techniques, of the discipline of control systems laboratory, in order to arouse the curiosity of students.

The physical plant was assembled with PVC pipes due to practicality, lower cost and assembly time. The controller was embedded in an Arduino Uno board and the ball position sensor chosen was the ultrasonic one. In addition to the PID control part through the MATLAB®[®] Simulink.

The creation of the 3D virtual plant was based on the "Ball and Beam" plant existing in the "Virtual Controls Laboratory" plugin, which uses Simscape together with Mechanics plus the MATLAB®[®] Simulink.

To achieve the objective, a literature review was carried out related to the air levitation plant, ultrasonic sensor, Arduino, control techniques and MATLAB®[®], among other topics related to the subject addressed.

With the physical and virtual plants, it was possible to make simulation using PID control and observe the response of the system.

Keywords: Air Levitation Plant, microcontroller, controller, PID, Arduino, MATLAB®[®], Simulink.

Lista de Figuras

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Planta do sistema de controle da levitação da bola por ar. | 17 |
| 2 | Esquemático de medição com sensor de ultrassom. | 22 |
| 3 | Sensor ultrassônico HCSR-04. | 23 |
| 4 | Ventilador. | 24 |
| 5 | Diagrama de forças. | 25 |
| 6 | Placa Arduino UNO. | 28 |
| 7 | Sinal PWM. | 29 |
| 8 | Malha de controle fechada. | 30 |
| 9 | Tipos de respostas a uma variação do <i>set point</i> | 31 |
| 10 | Interface. | 32 |
| 11 | Esquema de montagem da planta. | 35 |
| 12 | Detalhe montagem do fio. | 35 |
| 13 | Circuito para placa impressa. | 36 |
| 14 | Placa circuito impresso montada. | 37 |
| 15 | Esquema de ligação dos componentes eletrônicos. | 38 |
| 16 | Planta Virtual 3D feita em MATLAB®. | 39 |
| 17 | Planta Virtual 3D feita no Simscape. | 40 |
| 18 | Resposta ao degrau do modelo sem controlador. | 42 |
| 19 | Janela do <code>sisotool</code> para ajustar sintonia do PID. | 43 |
| 20 | Resposta ao degrau do modelo com controlador PID. | 44 |
| 21 | Módulos da planta. | 45 |
| 22 | Bola levitando na posição desejada. | 46 |
| 23 | Modelo da planta virtual 3D. | 46 |

| | | |
|----|---|----|
| 24 | Resposta ao degrau do modelo físico com controlador Proporcional. | 47 |
| 25 | Resposta ao degrau do modelo físico com controlador PI. | 48 |
| 26 | Resposta ao degrau do modelo físico com controlador PID. | 48 |

Lista de Tabelas

| | | |
|---|----------------------------------|----|
| 1 | Parâmetros da modelagem. | 25 |
| 2 | Lista de materiais. | 34 |
| 3 | Constantes da modelagem. | 41 |

Lista de abreviaturas e siglas

$3D$: Três dimensões (X,Y,Z)

A : Área da secção da bola de isopor.

C_a : Coeficiente de Arrasto.

DN : Diâmetro nominal do tubo de PVC.

$e(t)$: Erro entre posição da bola e referência.

F_a : Força do fluxo de ar.

F_g : Força gravitacional.

g : Gravidade.

Gnd : Terra do circuito.

\dot{h} : Derivada da Posição da bola.

\ddot{h} : Segunda Derivada da Posição da bola.

IDE: Ambiente de desenvolvimento integrado.

IHM: Interface Homem Máquina.

I/O: Input e Output.

k_D : Ganho Derivativo.

k_i : Ganho Integral.

k_p : Ganho Proporcional.

K_v : ganho que relaciona tensão com velocidade do ar.

m : Massa da bola.

μ : prefixo micro.

PBL: Problem Based Learning.

PCI: Placa de Circuito Impresso.

PID: Controle Proporcional Integral Derivativo.

PWM: Modulação por Largura de Banda.

ρ : Densidade do Ar.

RADAR: Radio Detection and Ranging.

RTS: Real Time Simulator.

T : período de amostragem:

TCC: Trabalho Conclusão de Curso.

t_{off} : Tempo que o pulso do PWM está em nível baixo.

t_{on} : Tempo que o pulso do PWM está em nível alto.

U : Tensão de alimentação do ventilador.

V_{ar} : Velocidade do fluxo de ar dentro do tubo.

V_{cc} : Tensão em Corrente Contínua.

V_{est} : Velocidade do ar no ponto de equilíbrio.

V_{som} : Velocidade do som.

ζ : constante de tempo do motor CC.

Sumário

| | |
|--|------------|
| Lista de Figuras | ix |
| Lista de Tabelas | xi |
| Lista de Abreviaturas e Siglas | xii |
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 Motivação e Justificativa | 18 |
| 1.2 Proposta e Objetivos do Trabalho de Pesquisa | 19 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 2.1 Sensor de distância/posição | 21 |
| 2.2 Ventilador | 23 |
| 2.3 Modelagem | 24 |
| 2.4 Controlador | 27 |
| 2.5 Controle | 29 |
| 2.6 Interface | 32 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 33 |
| 4 RESULTADOS | 42 |
| 5 Conclusão | 49 |
| 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros | 49 |
| Referências Bibliográficas | 50 |

| | |
|---|----|
| Apêndice A - Desenho Tubo DN 100 da Base do Levitador | 52 |
| Apêndice B - Desenho Tubo DN 50 do Topo do Levitador | 53 |
| Apêndice C - Base de Madeira do Levitador | 54 |

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho, foi investigado o projeto, a fabricação, a modelagem, o controle e a interface com usuário de uma planta de levitação de bola por ar de tubo de baixo custo para fins educacionais. A configuração dessa planta é um sistema de referência dinâmico, projetado para controlar a posição da bola em um fluxo de ar vertical ascendente que entra em equilíbrio com a força gravitacional exercida sobre a bola que levita sem suporte mecânico. Um ventilador alimenta o fluxo de ar e a posição da bola é mensurável usando um medidor de distância ultrassônico. Neste trabalho, o projeto e a construção de um sistema de tubos e bola são inicialmente realizados. A modelagem matemática detalhada do processo é incluída, seguida por um processo de identificação de parâmetros do sistema e, em seguida, um sistema de controle PID é desenvolvido estabelecendo uma conexão entre o circuito Arduino e a caixa de ferramentas em tempo real Simulink que será a interface dessa planta com usuário. O sistema destina-se a ser usado como uma referência e configuração de laboratório educacional em cursos de sistemas de controle. Este dispositivo serve para aumentar a compreensão e as habilidades dos alunos, fornecendo um equilíbrio adequado entre os conceitos teóricos e o conhecimento prático.

Outra parte abordada nesse trabalho foi a mesma planta de levitação da bola por ar feita em modelo virtual 3D através do Simscape com Mechanics mais o Simulink do MATLAB®. Essa planta foi feita a partir do modelo barra bola existente no *plugin "Virtual Hardware and Labs for Controls"* conforme referência [1].

Conforme apresentado na Figura 1, além da utilização de tubos de PVC, o sistema possui uma placa PCI universal onde foram soldados os componentes eletrônicos, dessa forma evita-se o uso de protoboard que pode gerar mal contato. Possui um sensor para fazer a medição da posição da bola e uma placa Arduino UNO para ser o controlador.

Figura 1: Planta do sistema de controle da levitação da bola por ar.



Fonte: Autor, 2022.

1.1 Motivação e Justificativa

Muitos estudantes sentem-se desmotivados por não conseguirem visualizar aplicações práticas dos conhecimentos teóricos adquiridos. Então, uma ferramenta para evitar esse problema é a utilização de protótipos, que permitem ao aluno colocar em prática conhecimentos teóricos, obter uma visão interdisciplinar do curso, estimular a curiosidade científica, além de ser incentivo para a busca do conhecimento [2]. A planta de controle da flutuação da bola por ar é um sistema de baixo custo para prática no laboratório de controle que passa a ser mais uma opção para o professor dessa disciplina colocar no roteiro das atividades práticas a serem desenvolvidas.

A tecnologia tem quebrado vários paradigmas e alterado vários postos de trabalho. Mudanças contínuas na sociedade, economia e tecnologia – no contexto da Quarta Revolução Industrial – são evidentes em aplicativos para transporte, vendas online, *softwares* para o setor jurídico, suporte remoto, dispositivos biomédicos, dentre vários outros exemplos do nosso novo dia-a-dia [3], [4]. Em situação não muito diferente encontra-se a educação na qual está sujeita a essa revolução tecnológica. Novos recursos tecnológicos possibilitam métodos inovadores que tendem a ser mais prazerosos, tanto para alunos como para professores, de modo a dinamizar e facilitar o aprendizado /ensino.

Neste contexto, as práticas PBL (*Problem based Learning*) têm ganhado destaque, no qual o objetivo principal é melhorar a aprendizagem exigindo que os alunos resolvam problemas [5]-[6]. Aqui deparamos com os seguintes problemas: além da criatividade do corpo docente, as escolas e universidades necessitam de maiores investimentos para contextualizar as teorias e conceitos aprendidos em sala de aula. Desse modo, alguns sistemas e equipamentos revelam-se onerosos para serem adquiridos nas instituições de ensino, o que muitas vezes impossibilita o emprego nos laboratórios.

As vantagens oferecidas pelo método são:

1. Não há necessidade de sistemas RTS (*Real Time Simulator*) de elevado custo, como os oferecidos pela TYPHON HIL [7], OPAL-RT [8], dSPACE [9] e RTDS [10]. Nesse sentido, podem-se utilizar o método remotamente, sem necessidade de um laboratório bem equipado, basta um computador ou notebook (para a simulação em 3D do sistema). Ou seja, não há necessidade de estar condicionado a uma montagem experimental complexa que envolve *hardware* e *software* sofisticados;
2. O controle/algoritmo do sistema é embarcado e o seu adequado funcionamento pode

ser verificado no sistema embarcado. É possível monitorar, fazer atualizações dos parâmetros iniciais, dos ganhos dos controladores, perturbações de entrada e de carga, etc., tudo isso de maneira amigável através da interface oferecida pelo MATLAB®/Simulink.

3. Possibilidades de ganhos no ensino-aprendizagem.

Uma desvantagem é a necessidade de instalação do MATLAB® ou *software* semelhante, que apresentam o maior dispêndio financeiro requerido, embora muitas Instituições de ensino já possuam este programa de simulação indispensável.

1.2 Proposta e Objetivos do Trabalho de Pesquisa

Este trabalho propõe o estudo, fabricação e a montagem de um protótipo de uma planta para levitação de bola por ar com controlador PID e *set point* ajustáveis por meio de uma interface feita no Simulink do MATLAB®, e também a criação do modelo virtual 3D dessa planta com uso do Mechanics mais Simscape e Simulink, para serem usadas didaticamente na disciplina de laboratório de controle, possibilitando ao estudante uma visualização prática de algumas técnicas de controle, pois além da técnica de controle PID que vai estar implementado, pode-se usar essa planta com outra técnica de controle. Já o professor terá mais essa opção de atividade prática para a disciplina.

Como objetivo geral, pretende-se, portanto, a montagem de um protótipo físico e virtual de uma planta para levitação de bola por ar de baixo custo com interface pelo Simulink do MATLAB®.

Os objetivos específicos podem ser sintetizados em:

- Fazer montagem de todo hardware com manuseio de componentes eletrônicos e o desenvolvimento da parte de controle no Simulink MATLAB® para aprendizagem e validação do resultado;
- Estudar sistema dinâmico e controle para aperfeiçoar o conhecimento em técnicas de controle;
- Projetar controladores e algoritmos no sistema embarcado por meio da interface amigável do Simulink e do `sisotool`;

- Contextualizar o problema ao aluno, que nesse contexto foi a montagem e controle da planta de levitação da bola por ar, assim, interagir o aluno ao problema através de exemplo prático.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sensor de distância/posição

Posição é a variável relacionada ao deslocamento de um objeto, essa variável é muito usada em diversos sistemas de controle, como por exemplo: nível de líquido em tanque, braços robóticos, válvulas, entre outros.

Os sensores podem ser classificados em passivos ou ativos. Os passivos possuem apenas o receptor e necessitam de uma fonte de energia externa para gerar o estímulo. Já os ativos contêm o emissor e o receptor não necessitando de fonte externa.

Existem diversos tipos de sensores para medir posição, como: indutivo, magnético, capacitivo, RADAR, ultrassônico e infravermelho. Dentre os sensores citados, será utilizado o sensor ultrassônico devido a praticidade em conectar ao Arduino e também ao baixo custo.

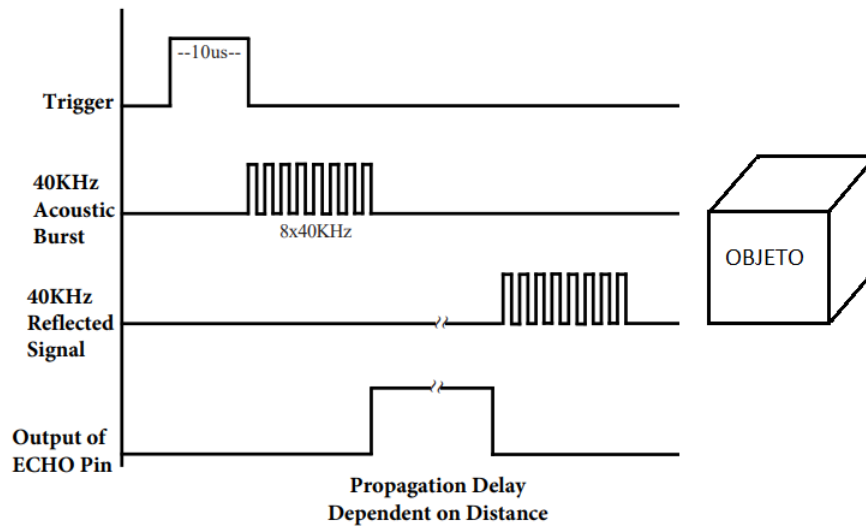
O sensor ultrassônico é um dispositivo para medição indireta que baseia-se no envio de sinais ultrassônico através de um transmissor (Trigger) e um receptor (Echo) que aguarda o retorno desses sinais, ou seja, o transmissor emite a onda sonora com frequência acima da audição humana, que ao encontrar um objeto em seu caminho é refletida, essa reflexão retorna para o receptor.

Conforme Figura 2, para começar a medição, o Trigger deve receber um pulso de 5 V por pelo menos 10 μ s, depois ele transmite 8 ciclos de pulsos ultrassônicos a 40 kHz, então o Echo espera em nível lógico alto pelo sinal refletido [11], dessa forma calcula o tempo gasto para a rajada de sinais ultrassônico percorrer do transmissor até objeto e retornar para o receptor. Com esse tempo que a onda gastou para percorrer a ida e volta até o sensor e sabendo que a velocidade do som é 340 m/s aproximadamente, pois pode variar dependendo das condições climáticas, é possível calcular a distância entre o objeto e o sensor através da seguinte equação (1).

$$d = \frac{T_{medido} \cdot v_{som}}{2}. \quad (1)$$

Observe que na equação (1) tem uma divisão por 2, isso é devido ao tempo calculado ser o total desde o disparo pelo Trigger até o objeto e ser refletida pelo objeto e chegar no Echo, ou seja, ida e volta da onda sonora.

Figura 2: Esquemático de medição com sensor de ultrassom.



Fonte: Adaptado de [12], 2022.

Na Figura 3 temos o sensor ultrassônico modelo HCSR-04 que será usado nesse projeto. O HCSR-04 possui quatro pinos: Vcc, Gnd, Trigger e Echo, todos com funções diferentes. Os pinos Vcc e Gnd alimentam o HCSR-04, esses pinos precisam ser conectados a uma fonte de +5 Vcc e Gnd, respectivamente. O Trigger é pino de controle, ele é responsável por enviar o sinal ultrassônico. O pino Echo é o pino de dados usado para fazer medições de distância.

Especificações do sensor ultrassônico modelo HCSR-04 [11]:

- Tensão de trabalho 5 Vcc;
- Corrente de trabalho 15 mA;
- Frequência de trabalho 40 Hz;
- Range mínimo 2 cm;
- Range máximo 4 m;

Figura 3: Sensor ultrassônico HCSR-04.



Fonte: <https://www.autocorerobotica.com.br/sensor-de-distancia-ultrassonico-hc-sr04>.

Uma das características do sensor é o seu tamanho que deve ser montado no topo do tubo que tem um diâmetro interno de 44 mm. E também deve detectar distâncias de pelo menos 30 cm e ao mesmo tempo ter uma distância mínima mensurável pequena. O tempo de resposta do sensor deve ser o mais baixo possível, ou seja, a frequência de amostragem deve ser alta. Além dessas características ter um custo baixo.

2.2 Ventilador

Para colocar a bola de isopor na posição desejada do *set point* será usado um ventilador com fluxo volumétrico suficiente para deslocar a bola e com ajuste de velocidade para controlar o fluxo volumétrico e consequentemente a posição da bola. O ventilador foi montado entre o tubo de DN 100 e a redução de DN 100x50.

O ventilador com característica ao da Figura 4 é alimentado com uma tensão de até 6 Vcc e corrente entre 0,5 e 1 A. Para controlar a velocidade será usado a modulação por largura de pulso PWM.

Figura 4: Ventilador.



Fonte: Autor, 2022.

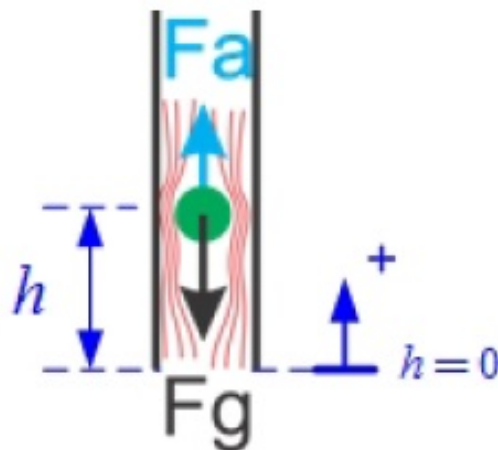
Para suportar a corrente requerida pelo ventilador, foi feito um circuito para acioná-lo, usado uma fonte externa, um transistor, um resistor e um diodo, pois as portas do Arduino suportam no máximo 20 mA.

2.3 Modelagem

Conforme Figura 5 o modelo para desenvolver a modelagem foi baseado em tubo com área transversal constante, porém, devido a abertura no sentido longitudinal do tubo (para ver a posição da bola), ocorre escape de ar, por isso, a velocidade do ar no interior do tubo diminui a medida que bola sobe ganhando altura em relação a base, então o ideal seria usar a equação da continuidade de fluidos para considerar que a área da seção transversal do tubo aumenta a medida que a velocidade do ar diminui. Como o foco desse trabalho não foi a modelagem, então foi usado esse modelo mais simples que já foi usado em outros trabalhos, como: [13] e [14].

Na Figura 5 é possível ver que as forças atuantes na bola são a força gravitacional F_g e a força do fluxo de ar F_a gerada pelo ventilador. Para uma melhor visualização da modelagem foi feito a Tabela 1 com os parâmetros do modelo.

Figura 5: Diagrama de forças.



Fonte: Adaptado de [13], 2022.

Tabela 1: Parâmetros da modelagem.

| PARÂMETROS | SIGNIFICADO | VALOR | UNIDADE |
|------------|--|----------|-------------------|
| F_g | Força da Gravidade | 0,0098 | N |
| m | Massa da bola | 0,001 | kg |
| g | Gravidade | 9,81 | m/s ² |
| F_a | Força do fluxo de Ar | variável | N |
| Ca | Coefficiente de arraste do ar | 0,47 | [adimensional] |
| ρ | Densidade do ar | 1,2754 | kg/m ³ |
| A | Área seção transversal da bola | 0,00385 | m ² |
| V | Velocidade do fluxo de ar | variável | m/s |
| V_{ar} | Velocidade do fluxo de ar dentro do tubo | variável | m/s |
| \dot{h} | Velocidade da bola | variável | m/s |
| \ddot{h} | Aceleração da bola | variável | m/s ² |
| V_{est} | Velocidade do ar no ponto de equilíbrio | variável | m/s |
| K_v | Ganho da relação velocidade do ar/tensão | 1 | [adimensional] |
| ζ | Constante de tempo do motor CC | 1,5 | [adimensional] |

Fonte: Autor, 2022.

Do diagrama temos que F_g é a força da gravidade que puxa a bola para baixo:

$$F_g = mg. \quad (2)$$

F_a é a força que o fluxo de ar do ventilador exerce sobre a bola para cima:

$$F_a = \frac{1}{2} C_a \rho A V^2. \quad (3)$$

onde, C_a é o coeficiente do arrasto, ρ é a densidade do ar, A é a área da secção da bola perpendicular ao fluxo do ar, V é a velocidade do fluxo de ar. Na equação abaixo temos o modelo dinâmico com o efeito da velocidade do ar em relação à velocidade da bola [14]:

$$F_a = \frac{1}{2} C_a \rho A (V_{ar} - \dot{h})^2. \quad (4)$$

onde, V_{ar} é a velocidade do fluxo de ar dentro do tubo, \dot{h} é a derivada da posição da bola dentro do tubo considerando o referencial zero a base do tubo onde está o ventilador. A força resultante conforme segunda lei de Newton é:

$$m\ddot{h} = \frac{1}{2} C_a \rho A (V_{ar} - \dot{h})^2 - mg. \quad (5)$$

Quando a bola estiver flutuando em estado estacionário, a velocidade é zero logo a aceleração também é zero, então $\ddot{h} = \dot{h} = 0$. Considerando V_{est} a velocidade do ar nesse ponto de equilíbrio [14], temos:

$$m = \frac{1}{2g} C_a \rho A V_{est}^2. \quad (6)$$

Substituindo a equação (6) em (5), temos a seguinte equação não linear.

$$\ddot{h} = g \left(\left(\frac{V_{ar} - \dot{h}}{V_{est}} \right)^2 - 1 \right). \quad (7)$$

Fazendo a devida linearização desse sistema não linear para sistema linear por meio da série Taylor de primeira ordem [14]. Temos:

$$\ddot{h} = \frac{2g}{V_{est}} [V_{ar} - \dot{h} - V_{est}]. \quad (8)$$

Usando a transformada de Laplace, temos a seguinte função de transferência para a planta desse sistema.

$$\frac{H(s)}{V_{ar}(s)} = \frac{\frac{2g}{V_{est}}}{s \left(s + \frac{2g}{V_{est}} \right)}. \quad (9)$$

A função de transferência entre a tensão de alimentação (U) do ventilador e a veloci-

dade do fluxo de ar é [14]:

$$\frac{V_{ar}(s)}{U(s)} = \frac{K_v}{\zeta s + 1}. \quad (10)$$

Onde, K_v ganho que relaciona a tensão com a velocidade do ar e ζ é a constante de tempo do motor CC. Logo para o sistema temos a seguinte função de transferência conforme equação (11).

$$\frac{H(s)}{U(s)} = \frac{\frac{2g}{V_{est}} K_v}{s \left(s + \frac{2g}{V_{est}} \right) (\zeta s + 1)}. \quad (11)$$

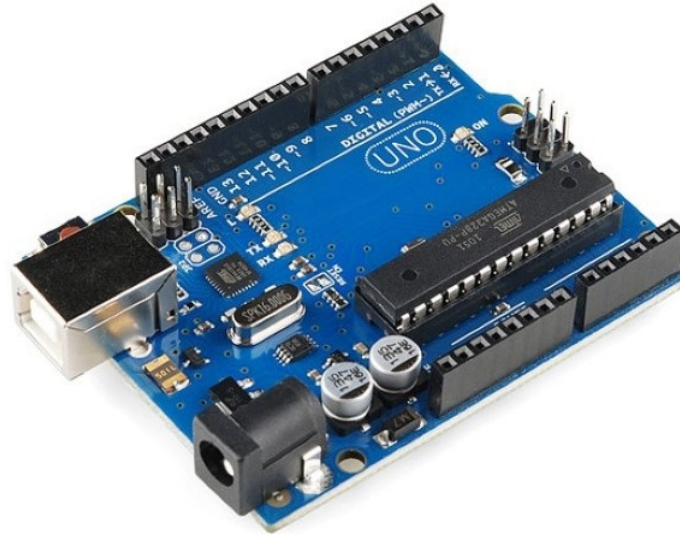
Podemos estimar V_{est} usando a equação (12) abaixo:

$$V_{est} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot m}{C_a \cdot \rho \cdot A}}. \quad (12)$$

2.4 Controlador

Os componentes básicos de uma placa Arduino UNO são um microprocessador atmega 328 AVR, um oscilador para gerar o *clock* de 16 MHz da placa e um regulador de tensão de 5 V. Dependendo da versão do Arduino há também uma saída USB, possibilitando a conexão do mesmo a um computador para fazer o *upload* ou recuperar os dados contidos na placa [15]. A placa possui pinos digitais que podem ser codificados como entrada ou saída e alguns desses pinos digitais podem ser saídas com PWM (modulação por largura de pulso) caso sejam configurados para essa função. Há na placa vários protocolos de comunicação como I2C, serial e outros. Essa placa possui 14 pinos I/O sendo 6 desses PWM, nesses pinos a corrente é 20 mA. A Figura 6 mostra como é a placa do Arduino Uno.

Figura 6: Placa Arduino UNO.



Fonte: <https://www.filipeflop.com/produto/placa-uno-r3-cabo-usb-para-arduino/>.

A programação desta placa é baseada na linguagem C e pode ser feita na IDE (*Integrated Development Enviroment*) do Arduino, que é um ambiente para programação da placa Arduino. E também pode programar com blocos através do Simulink do MATLAB® desde que tenha instalados os plugins necessários, essa foi a plataforma usada nesse projeto.

Essas interfaces permitem que o usuário escreva *sketches*, que nada mais são que programas para o Arduino, e faça o *upload* dos mesmos para a memória *flash* do microcontrolador através de uma porta USB, fazendo com que o Arduino interaja com qualquer periférico que esteja conectado a ele [15].

Foi usado um Arduino UNO como controlador, o mesmo vai conectar duas portas digitais aos pinos Trigger e Echo do sensor ultrassônico para fazer a medição da posição da bola de isopor no interior do tubo. Esse controlador vai fazer os cálculos de controle PID e alterar uma saída PWM para controlar a velocidade do motor e conseqüentemente a posição da bola.

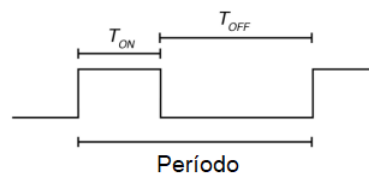
O PWM é um sinal baseado em um chaveamento para controlar a variação da largura do pulso de uma onda quadrada. Com esse controle através do chaveamento é possível obter nível de tensão entre 0 e a tensão máxima da fonte de energia que nesse projeto é de

5 Vcc. Conforme Figura 7 a largura do pulso da onda em porcentagem também chamado de Duty Cycle é dada pela equação (13)

$$\eta = \frac{t_{on}}{T}. \quad (13)$$

Onde, Duty Cycle é o valor em % da largura de pulso, t_{on} é o tempo que o sinal PWM está em nível lógico alto e o Período é o período de um ciclo de onda do PWM. Ou seja, a tensão média obtida será igual ao Duty cycle vezes a tensão máxima fornecida pela fonte externa.

Figura 7: Sinal PWM.



Fonte: Autor, 2022.

O pino digital com saída PWM da placa arduino tem 8 bits de dado, logo o PWM pode variar entre 0 e $(2^8 - 1)$, ou seja, entre 0 e 255. A frequência do sinal PWM na maioria dos pinos é aproximadamente 490 Hz, com exceção dos pinos 5 e 6 que usam uma frequência de aproximadamente 980 Hz.

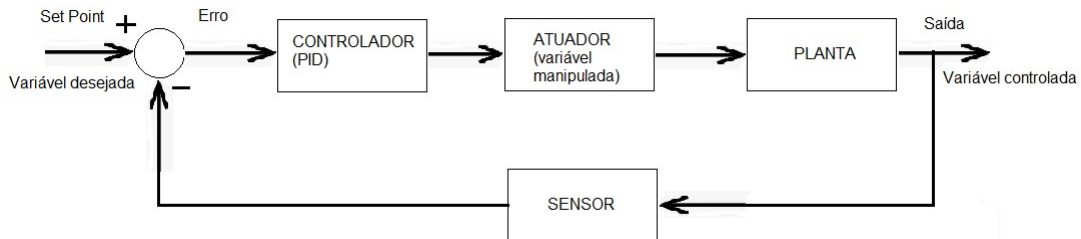
2.5 Controle

Planta é um sistema físico a ser controlado que é constituído por um equipamento ou um conjunto de componentes de um equipamento que opere de forma integrada, com o objetivo de realizar determinada operação [16]

Um sistema de controle tem o objetivo de controlar uma variável de processo, que pode ser: nível, temperatura, pressão, entre outras, através da variável manipulada em uma planta qualquer. Onde a variável de processo ou variável controlada é a grandeza medida na saída do sistema, já a variável manipulada é a grandeza modificada pelo controlador que altera a variável de processo. Por exemplo para aumentar a pressão de gás em um queimador de forno industrial é necessário atuar na vazão desse gás, ou seja, a variável controlada é a pressão mas a variável manipulada é a vazão.

Em um sistema malha fechada, a entrada depende tanto do referencial adotado (*set point*) quanto do sinal de saída da variável de processo, gerando assim um sinal de erro. Esse sinal de erro é usado para ajustar a entrada do sistema compensando o efeito de perturbação do processo [17]. O sistema em malha fechada é exemplificado na Figura 8.

Figura 8: Malha de controle fechada.



Fonte: Autor, 2022.

Nesse diagrama temos que o *set point* é a posição desejada da bola, o atuador é o ventilador, a variável manipulada é a tensão de alimentação do ventilador e a variável controlada é a posição da bola que o sensor ultrassônico está medindo.

Dentre as várias estratégias de controle, tais como lugar das raízes, avanço e atraso de fase e o PID, esse último é o mais usado. O PID consiste em gerar um sinal para o atuador no processo através da soma de três operações, que são: a multiplicação por um ganho fixo, a integração e a derivação sobre o sinal chamado de erro, que consiste na diferença entre o valor medido na saída da planta e o valor de referência desejado (*set point*). A equação (14) tem a expressão matemática do controle PID para tempo contínuo.

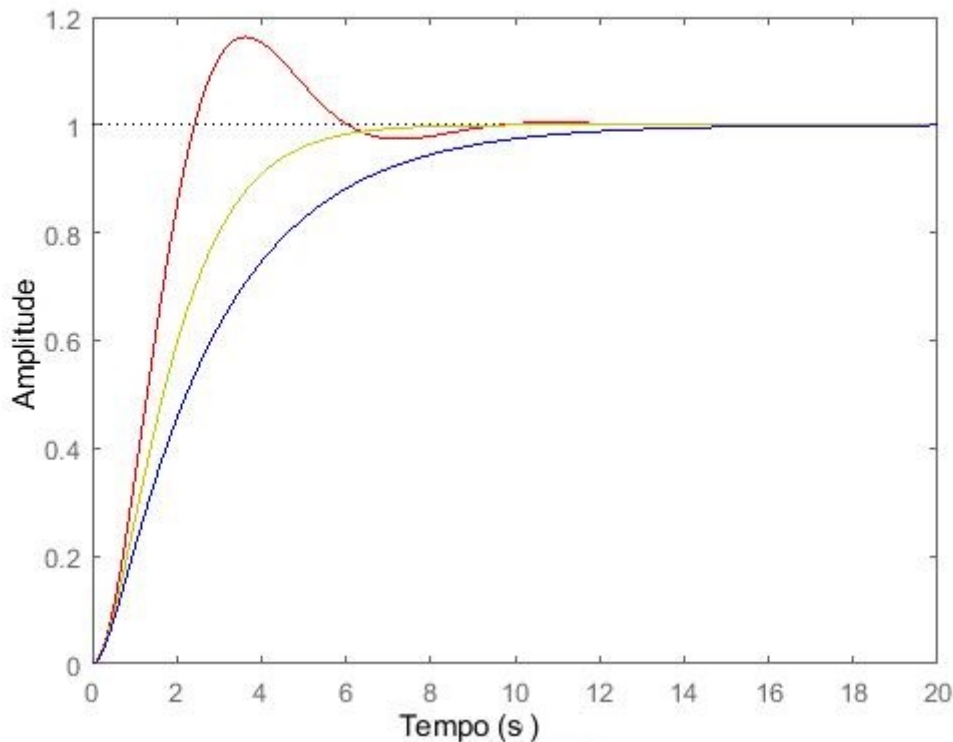
$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t). \quad (14)$$

A ação proporcional consiste na aplicação de um ganho K_p ao sistema onde diminui o erro em regime estacionário do sistema. A rapidez na resposta é o valor de K_p , no entanto, um valor muito alto pode levar o sistema à instabilidade, por isso, usa-se critério de estabilidade como o de Routh-Hurwitz para saber a margem que o K_p pode variar. A ação integral tem a característica de eliminar o erro em estado estacionário, porém quanto maior esse fator K_i mais oscilatório torna-se o regime transitório do sistema. Com o controlador derivativo, o objetivo é utilizá-lo para uma rápida correção na variável de processo, buscando um melhor tempo de resposta do regime transitório [17].

Deve-se observar que quando o fator integral do PID é utilizado, pode acontecer do termo integral tender a se tornar muito grande devido por exemplo o atuador já está com o sinal máximo, ou seja, sinal saturado, porém a variável controlada está fora do *set point*, pois nesse caso a integral continua somando o erro, dando origem ao fenômeno denominado *wind-up*. Para corrigir o efeito *wind-up* o controlador PID deve possuir em seu algoritmo rotinas de *reset* da ação integral, que impede que o termo integral continue a ser atualizado quando a saída atinge seu limite máximo. O bloco PID do Simulink do MATLAB® possui esse recurso e foi habilitado.

A Figura 9 ilustra as possíveis respostas do sistema, onde em vermelho uma resposta subamortecida, em amarelo um sistema criticamente amortecido e em azul um sistema superamortecido.

Figura 9: Tipos de respostas a uma variação do *set point*.



Fonte: Autor, 2022.

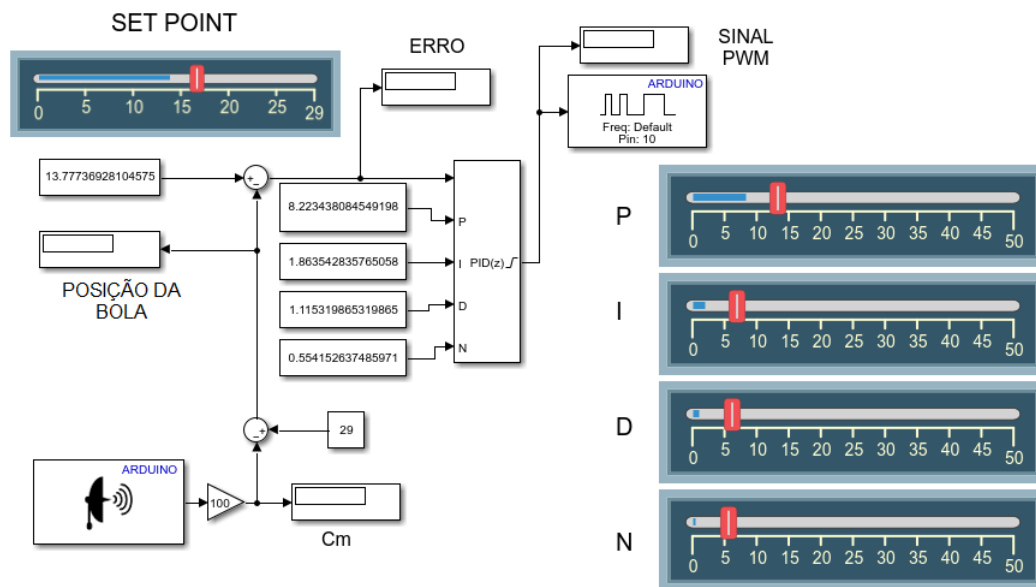
O controlador pode ser analógico (tempo contínuo) ou ser digital (discreto). O controlador analógico é composto de circuitos eletrônicos com amplificadores operacionais, resistores e capacitores. E baseia na resposta em frequência sendo trabalhado no domínio s .

Já o controlador digital é baseado em sinais discretos no tempo e esses sinais são gerados através de amostragens de uma variável contínua em um período de tempo entre amostragem chamado de T e é trabalhada no domínio z . A estratégia de controle é embarcada via *software*.

2.6 Interface

A interface foi projetada uma aplicação desenvolvida no Simulink do MATLAB® para possibilitar alterações dos parâmetros de controle PID e também do *set point* da posição da bola de isopor. Essa interface é similar a uma IHM (interface Homem Máquina) que é um *software* que possibilita a alteração e acompanhamento do processo através de uma tela, fazendo a interligação entre o usuário e a planta. Na Figura 10 é possível ver um exemplo dessa interface.

Figura 10: Interface.



Fonte: Autor, 2022.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido nas seguintes etapas:

- Compra dos materiais;
- Montagem da planta física;
- Desenvolvimento da interface com Simulink;
- Desenvolvimento da planta virtual;
- Testes da planta;
- Desenvolvimento da parte de controle da planta;
- Consolidação e validação dos resultados.

A etapa de compra dos materiais é apresentada na Tabela 2, onde lista os itens que foram comprados.

A etapa de confecção e montagem da planta representada pela Figura 11 que inicia com o corte do tubo DN 100 (item 1) conforme desenho do Apêndice A, foi usado uma micro retífica modelo Hammer MI150 para fazer o corte. Depois foi encaixado o ventilador (item 5), para fazer esse encaixe, foi necessário aquecer a ponta do tubo DN 100 para deixá-la maleável. Em seguida, foi montado a redução de DN 100x50 (item 2), onde o lado do DN 100 foi encaixado no ventilador, para esse encaixe, também foi necessário aquecer a ponta para deixá-la maleável. Já no lado do DN 50 dessa mesma redução foi montado o tubo DN 50 (item 3).

O tubo DN 50 (item 3) representada pela Figura 11 foi cortado conforme apresentado no desenho do Apêndice B com 33 cm de comprimento e feita uma abertura no sentido longitudinal para saída de ar e possibilitar a visualização da posição da bola de isopor, para isso foi usado serra mármore modelo GDC 150. Nesse tubo conforme Figura 12 foram fixados com auxílio de durex, dois pedaços de fio dental na extremidade que foi montado no lado DN 50 da redução DN 100x50 com a finalidade de não deixar a bola de

isopor cair na região da redução. No tubo (item 3) da Figura 11 foi colada uma tira de papel dupla face onde foi impresso uma escala graduada de 0 até 28 cm que serve para ter referência da posição da bola.

Tabela 2: Lista de materiais.

| ITEM | MATERIAL | MODELO | VALOR | FORNECEDOR |
|------|---------------------------|-------------|-------------------|-------------------|
| 1 | TUBO PVC ESGOTO | DN 100 | R\$ 14,90 | DEPÓSITO |
| 2 | REDUÇÃO ESGOTO | 100X50 | R\$ 7,90 | DEPÓSITO |
| 3 | TUBO PVC SOLDÁVEL | DN 50 | R\$ 13,20 | DEPÓSITO |
| 4 | SENSOR ULTRASSÔNICO | HCSR-04 | R\$ 15,00 | ALIEXPRESS |
| 5 | MINI VENTILADOR DE MÃO | PORTÁTIL 5V | R\$ 12,00 | SHOPEE |
| 6 | BOLA ISOPOR | Ø 35 | R\$ 0,80 | PAPELARIA |
| 7 | ARDUINO | UNO | R\$ 40,00 | ALIEXPRESS |
| 8 | PLACA PCI UNIVERSAL | 5X7cm | R\$ 6,90 | ELETROGATE |
| 9 | TRANSISTOR | NPN TIP31C | R\$ 1,91 | BAÚ DA ELETRÔNICA |
| 10 | RESISTOR | 1k OHM | R\$ 0,10 | BAÚ DA ELETRÔNICA |
| 11 | CONECTOR BORNER | KRE 2 VIAS | R\$ 1,90 | ELETROGATE |
| 12 | CABO FLAT 4 VIAS COLORIDO | 40 cm | R\$ 2,00 | BAÚ DA ELETRÔNICA |
| 13 | PEÇA MADEIRA | - | - | - |
| 14 | DIODO | IN4007 | R\$ 0,25 | ELETROGATE |
| 15 | CABO USB A-B | - | - | ALIEXPRESS |
| 16 | FONTE | 5V | 1 | - |
| 17 | COMPUTADOR | - | 2 | - |

Fonte: Autor, 2022.

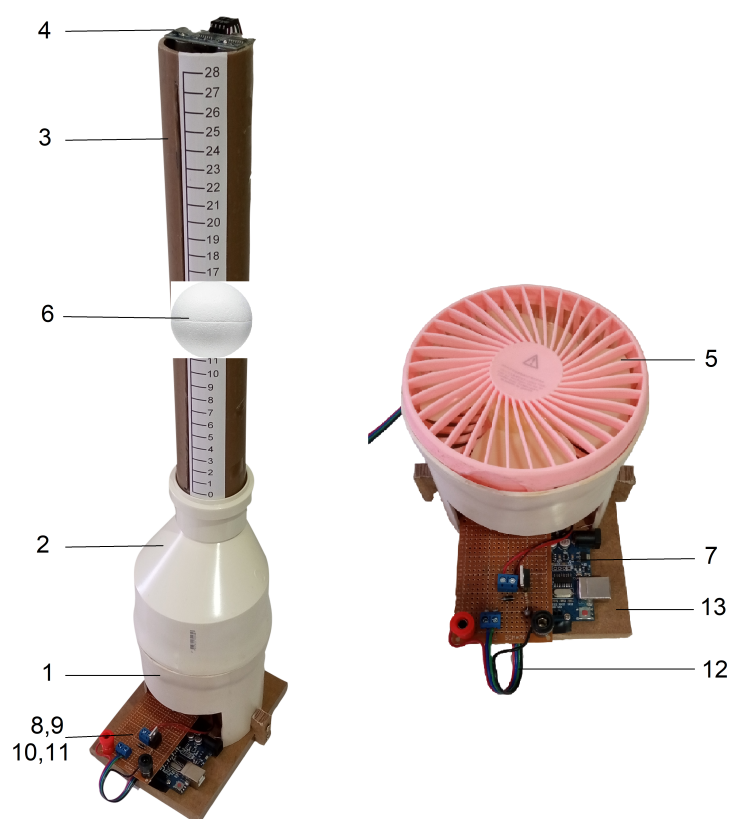
[1](#) [2](#)

¹foi usado uma fonte de computador velho.

²foi usado um notebook de uso pessoal.

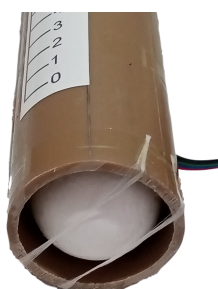
Foi usado o material isopor para a bola (item 6) devido ser leve e de baixo custo. Para essa bola foi usado o \varnothing 35 devido encaixar com uma leve folga no interior do tubo DN 50.

Figura 11: Esquema de montagem da planta.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 12: Detalhe montagem do fio.

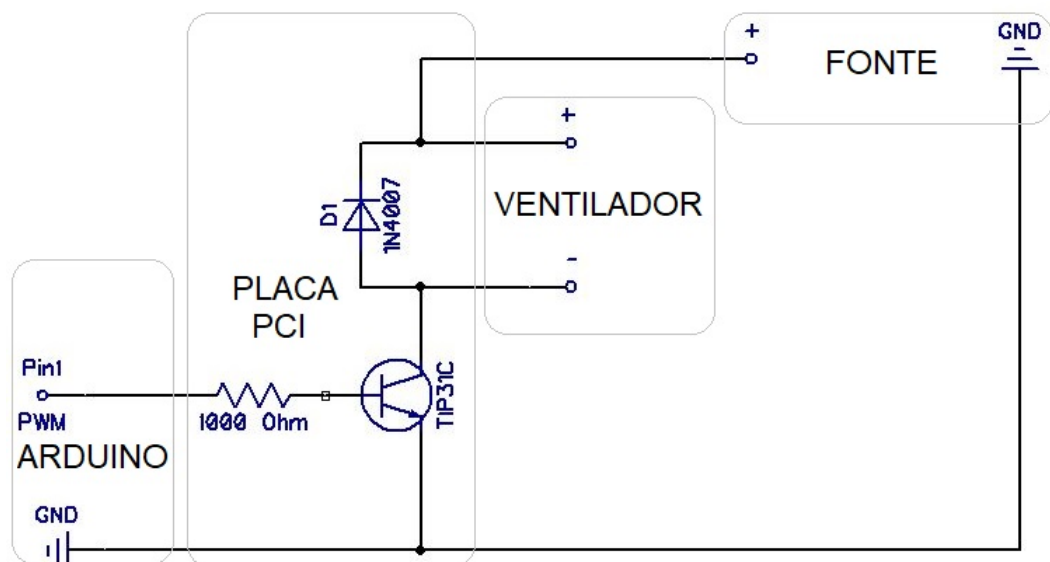


Fonte: Autor, 2022.

Foi cortado usando serra mármore um pedaço de tábua de MDF com a dimensão 10x14 cm conforme apresentado no desenho do Apêndice C. Esse item foi usado para montar o tubo base do levitador par facilitar o transporte e fixar a placa Arduino, pois os tubos são apenas encaixados. Essa peça de MDF foi confeccionada usando parte de móveis de casa que foi para o descarte no lixo.

A placa foi soldada conforme esquema elétrico apresentado na Figura 13, onde foi usado a placa universal e soldado os componentes itens 8, 9, 10, 11 e 14 da Tabela 2. Na Figura 14 temos como ficou placa soldada.

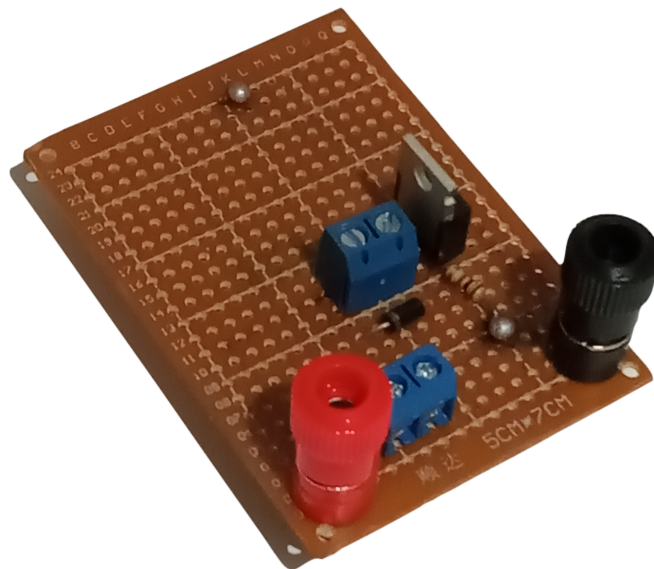
Figura 13: Circuito para placa impressa.



Fonte: Autor, 2022.

Observe que o resistor do item 10 da Figura 11 e 13 deve ter um valor igual ou maior que 250Ω , pois, a porta analógica do arduino tem 5 Vcc de tensão e suporta uma corrente máxima de 20 mA, logo pela lei de Ohm a resistência deve ter o valor superior a 250Ω , nesse projeto foi usado $1 \text{ k}\Omega$.

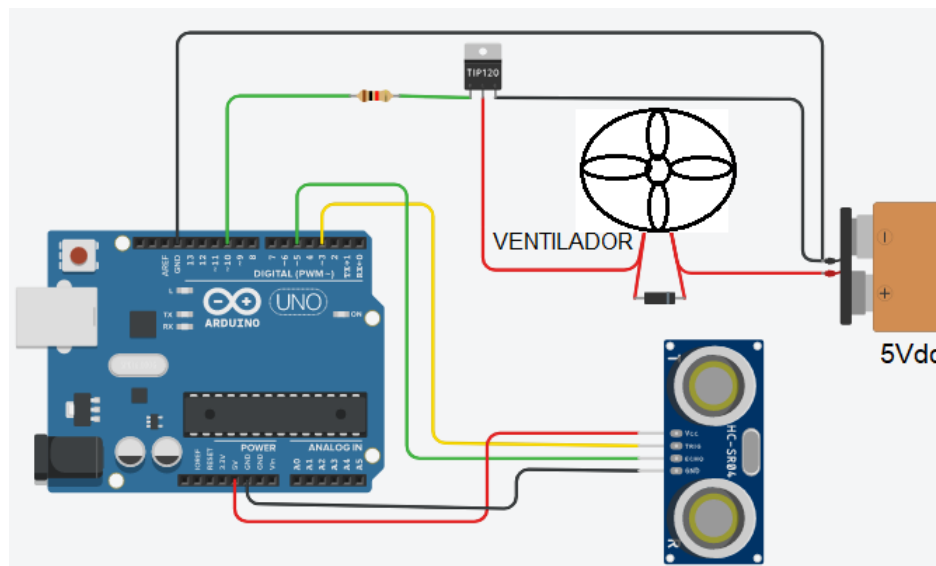
Figura 14: Placa circuito impresso montada.



Fonte: Autor, 2022.

Conforme o esquema de montagem visto na Figura 15, o sensor (item 4) será ligado ao Arduino (item 7) com um cabo flat de 4 vias (item 12), duas vias para portas digitais Trigger e Echo, outra para alimentação +Vcc de 5 V e a quarta via para alimentação do Gnd. Uma porta de saída PWM do Arduino vai conectar ao gate do transistor (item 9) através do pino 1 da Figura 13, o coletor (terminal 2) desse transistor é conectado ao polo negativo do ventilador e o polo positivo do ventilador é ligado a fonte (item 16) de 5 Vcc. Já o emissor (terminal 3) desse transistor é ligado ao polo negativo da fonte e também ligado ao Gnd da placa do Arduino. Por fim, foi colocado um diodo (item 14) ligando os terminais positivo e negativo do ventilador funcionando como roda livre para descarregar a bobina do ventilador quando a mesma for desenergizada.

Figura 15: Esquema de ligação dos componentes eletrônicos.



Fonte: Autor, 2022.

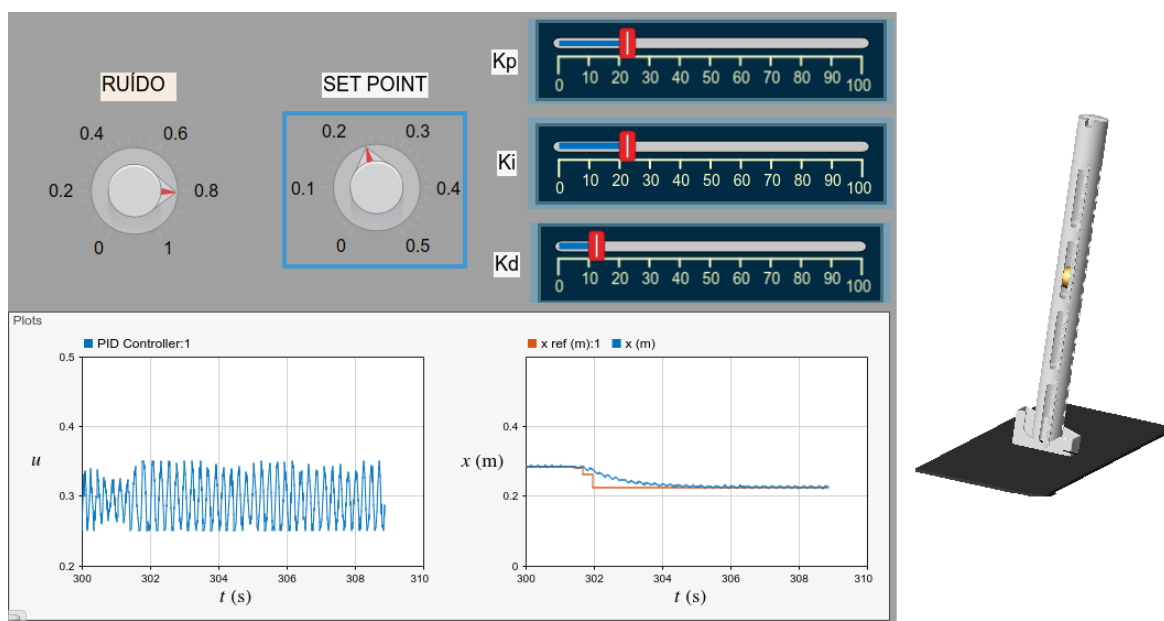
Os testes na planta foram realizados após a finalização da montagem da planta, então usando um programa feito no Simulink do MATLAB® conforme Figura 10 e através de plugins que devem ser previamente instalados, como: *Simulink Support Package for Arduino Hardware* e o *MATLAB® Support Package for Arduino Hardware*, será compilado e embarcado o código no microcontrolador da placa Arduino UNO. Assim, simulações alterando os parâmetros de *set point* e PID e analisado a coerência da resposta da planta foram observadas.

Na Figura 10 é possível visualizar um bloco do sensor ultrassônico, nele é configurado as portas do Arduino onde estão ligados os pinos do Trigger e Echo, sua saída é a distância em metros. Na saída desse bloco temos um bloco (*Gain*) com ganho igual a 100, para conversão das unidades de medidas de metros para centímetros medida pelo sensor ultrassônico. Para ajuste da escala de posição zero da bola, subtraiu-se 29 cm devido ser o comprimento útil do tubo item 3 da Figura 11 através de um bloco somador, isso devido a posição zero da bola ser na base do tubo DN 50 e não onde está montado o sensor ultrassônico. Depois esse valor é subtraído do valor da posição desejada (*Set point*), assim temos o erro entre o *Set point* e posição da bola. Esse erro entra no bloco PID que faz os devidos cálculos e gera um valor entre 0 e 255 para porta PWM do Arduino onde está ligado o pino 1 da Figura 13. Dessa forma o valor da tensão no ventilador é modulada para manter a bola na posição desejada.

A etapa de desenvolvimento da parte de controle da planta consiste em configurar o bloco PID da Figura 10 através de técnicas como Ziegler-Nichols, IMC ou teste experimental de valores para o PID acompanhando a resposta da planta. Também foi usado anti *wind-up* para impedir que o integrador continue a se carregar quando a saturação ocorre.

Na sequência do projeto foi feito uma planta virtual com uso do Simscape mais Mechanics juntamente com Simulink do MATLAB®. Na Figura 16 é possível visualizar a interface feita no Simulink onde é possível alterar os valores do controle PID, *set point* e também variar um ruído que altera o sinal de saída do PID. E para ajudar na visualização da dinâmica do sistema foram colocados dois gráficos, sendo o sinal de saída do PID e o outro é o *set point* com a resposta do sistema que é a variável de processo, ou seja, a posição da bola. Por fim, na Figura 16 é possível ver o modelo virtual 3D propriamente dito, o mesmo foi montando usando Mechanics mais Simscape.

Figura 16: Planta Virtual 3D feita em MATLAB®.

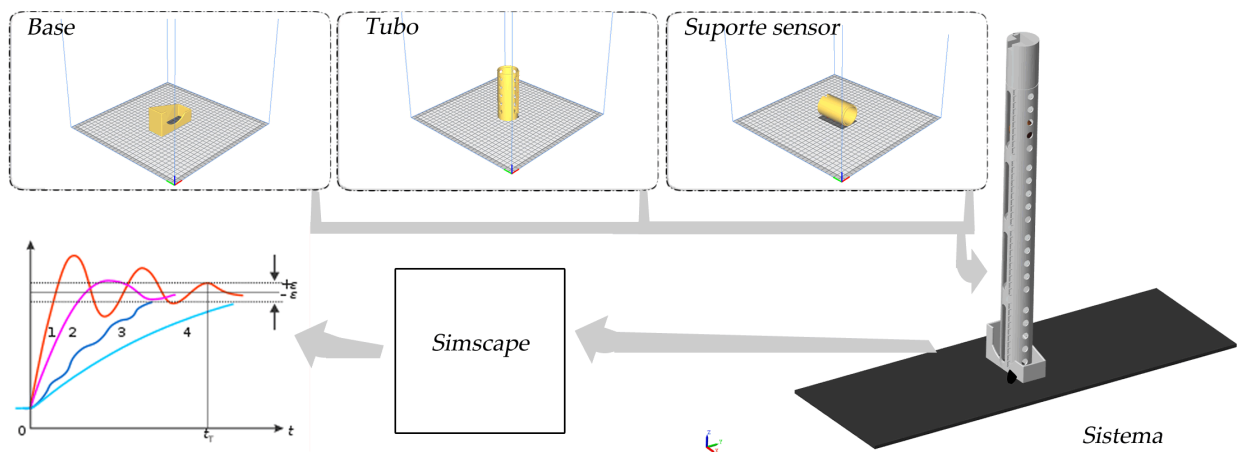


Fonte: Autor, 2022.

A planta virtual foi montada usando o *plugin "Virtual Hardware and Labs for Controls"* do MATLAB®, onde encontra-se disponível diversos modelos mecânicos usados em curso de controle, então foi utilizado o arquivo do Ballandbeam.slx. Após projetar os arquivos 3D (extensão *.stl*) das peças componentes do sistema em um software 3D como, por exemplo, Fusion 360 da Autodesk®, as mesmas são unificadas por meio dos blocos

disponíveis pelo *Simscape Mechanics* e *Simscape Multibody*, conforme mostra Figura 17. A dinâmica da planta virtual 3D representa a dinâmica do modelo físico real, ou seja, consiste basicamente em configurar uma força que puxa a bola para baixo, ou seja, força da gravidade e uma força controlável de oposição a essa força da gravidade, ou seja, a força que seria feito pelo fluxo ascendente do ar empurrado pelas hélices do ventilador.

Figura 17: Planta Virtual 3D feita no Simscape.



Fonte: Autor, 2022.

Usando a modelagem conforme resultado obtido nas equações (11) e (12) e atribuindo os seguintes valores para as variáveis:

- $K_v = 1$;
- $\zeta = 1,5$;
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$;
- $m = 0,001 \text{ kg}$;
- $Ca = 0,47$;
- $\rho = 1.2754 \text{ kg/m}^3$;
- $D = 0,035 \text{ m}$;

Na Tabela 3 foi relacionado as constantes da modelagem com seus respectivos significados para uma fácil visualização.

Tabela 3: Constantes da modelagem.

| CONSTANTES | SIGNIFICADO | VALOR | UNIDADE |
|------------|---|--------|-------------------|
| K_v | Ganho que relaciona velocidade do ar com a tensão | 1 | [adimensional] |
| ζ | Constante de tempo do motor CC | 1,5 | [adimensional] |
| g | Gravidade | 9,81 | m/s ² |
| m | Massa da bola | 0,001 | kg |
| Ca | Coefficiente de arraste do ar | 0,47 | [adimensional] |
| ρ | Densidade do ar | 1,2754 | kg/m ³ |
| D | Diâmetro da bola | 0,035 | m |

Fonte: Autor, 2022.

Temos a seguinte função de transferência teórica para a planta:

$$G_c(s) = \frac{H(s)}{U(s)} = \frac{3.364}{1,5s^3 + 6.046s^2 + 3.364s}. \quad (15)$$

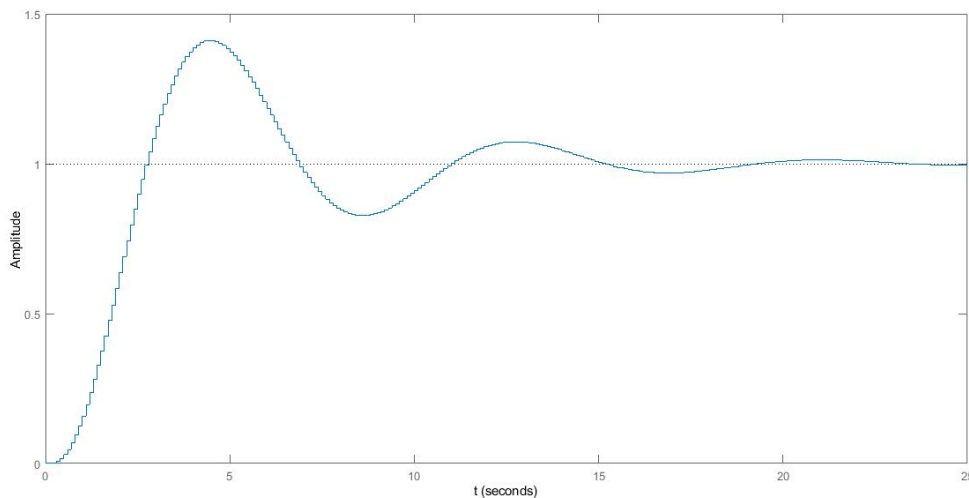
Como o controle foi embarcado em controlador digital, foi necessário converter a função de transferência da equação (15) de tempo contínuo para discreto, para isso, foi usado a função `c2d(Gc, 0.1, 'zoh')` do MATLAB®), onde: o primeiro argumento é a função de transferência do sistema dinâmico que foi convertida de tempo contínuo para discreto, o segundo argumento é a taxa de amostragem e o terceiro argumento é o método de discretização, nesse caso foi usado o segurador de ordem zero. Após a conversão foi obtida a seguinte função de transferência em tempo discreto:

$$G_d(z) \frac{H(z)}{U(z)} = \frac{0.0003386z^2 + 0.001227z + 0.0002768}{z^3 - 2.65z^2 + 2.318z - 0.6683}. \quad (16)$$

4 RESULTADOS

Usando a função `step(feedback(Gd,1))` do MATLAB®[®], onde: o parâmetro G_d é a equação (16) e o parâmetro 1 é a realimentação unitária, obteve a Figura 18 que é a resposta ao degrau do sistema sem controle. Da resposta ao degrau observa-se que em estado estacionário o sistema não tem erro, isso é devido na modelagem equação (11) ter um zero na origem, ou seja, na modelagem o sistema já possui um integrador. Observa-se também, que o sistema possui um tempo de subida de 2,5 segundos, um sobressinal de 40% e um tempo de acomodação próximo de 20 segundos.

Figura 18: Resposta ao degrau do modelo sem controlador.

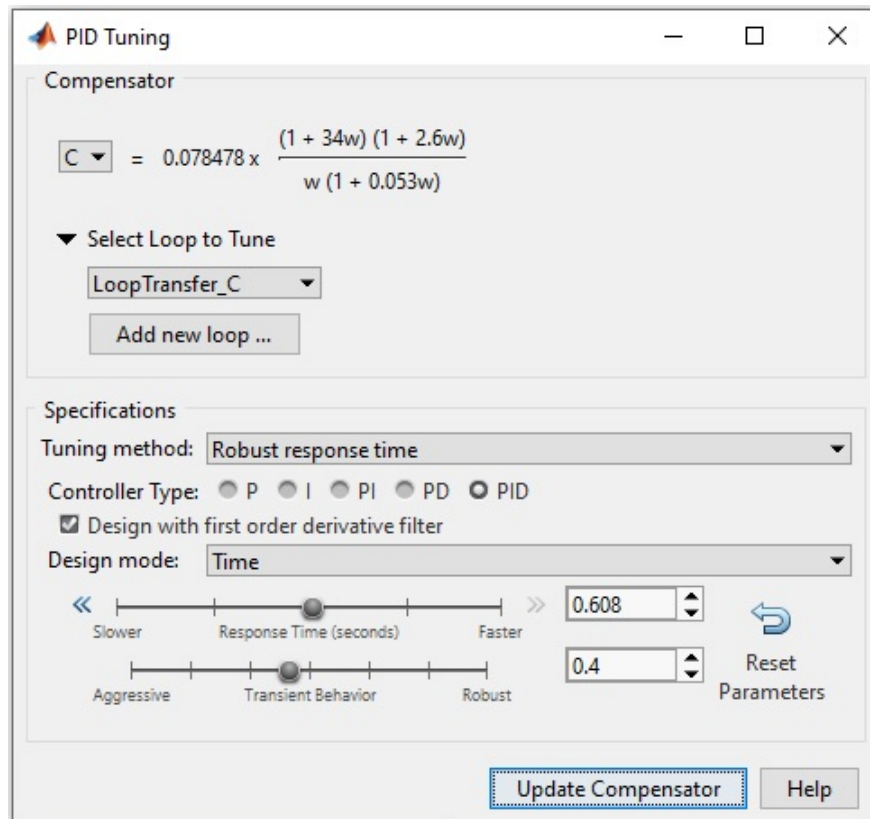


Fonte: Autor, 2022.

Para melhorar a resposta obtida na Figura 18 foi projetado experimentalmente um controlador PID através da função `sisotool(Gd)` do MATLAB®[®]. Onde o parâmetro G_d é a função de transferência do sistema obtida na equação (16). Na Figura 19 é mostrado como foi feita a sintonia do PID, onde foi escolhido o PID com filtro derivativo de segunda ordem, pois sem esse filtro o resultado obtido é uma função imprópria, logo na prática esse controlador não seria implementável. Para a sintonia do PID deve-se variar

os parâmetros *Response Time* e o *Transient Behavior* e fazer *Update* do controlador e observar se a resposta obtida atende ao especificado.

Figura 19: Janela do *sisotool* para ajustar sintonia do PID.



Fonte: Autor, 2022.

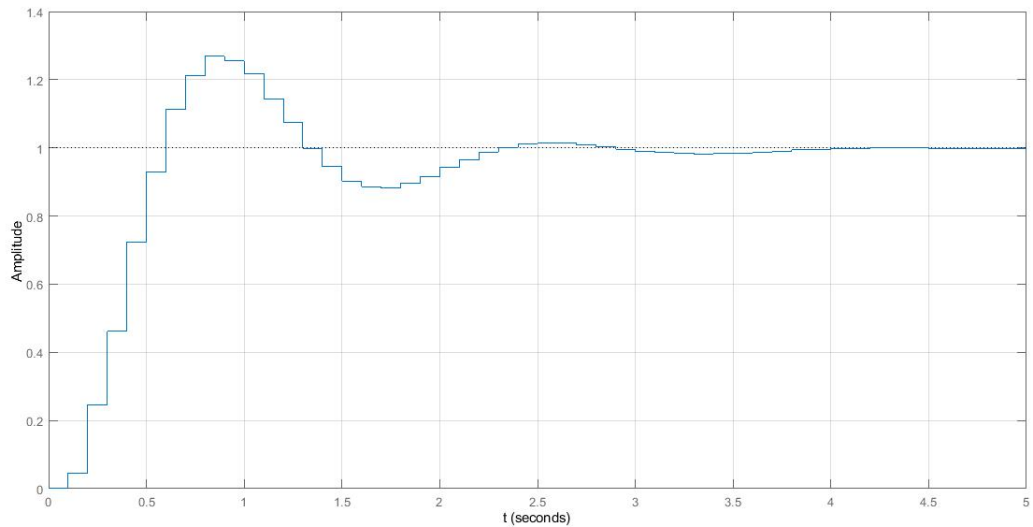
Foi desejado que a resposta ao degrau tivesse tempo de subida menor que 1 segundo, sobressinal menor que 25% e tempo de acomodação menor que 4 segundos. Após os ajustes no PID foi obtido o controlador conforme equação (17) para atender os parâmetros especificados.

$$C_{PID}(z) = 135,04 \frac{(z - 0,9971)(z - 0,9619)}{(z - 1)(z + 0,8998)}. \quad (17)$$

Com o controlador da equação (17) foi obtido a resposta ao degrau conforme a Figura 20, onde é possível ver que a resposta ao degrau do sistema tem tempo de subida próximo de 0,5 segundo, sobressinal menor que 30% e tempo de acomodação próximo de 4 segundos, logo com o controlador da equação (17) conseguiu obter um regime transitório

e permanente dentro do especificado.

Figura 20: Resposta ao degrau do modelo com controlador PID.



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 1 é o resultado final, ou seja, a planta física de levitação de bola por ar já completamente montada. Na Figura 21 é possível ver que a planta é modular, podendo ser desmontada para guardar em espaços com limitação de altura. Na Figura 22 é possível ver a bola levitando próximo da posição 21cm. Na Figura 23 é possível ver como ficou o modelo virtual 3D da planta feito no MATLAB®.

Figura 21: Módulos da planta.



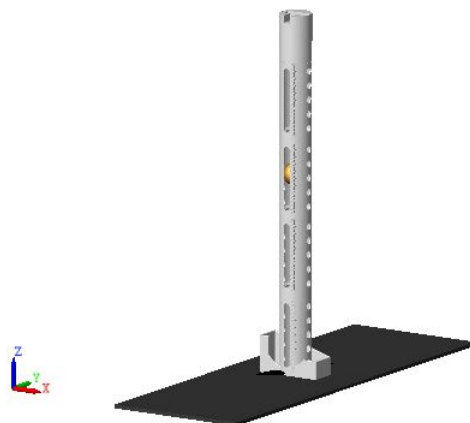
Fonte: Autor, 2022.

Figura 22: Bola levitando na posição desejada.



Fonte: Autor, 2022.

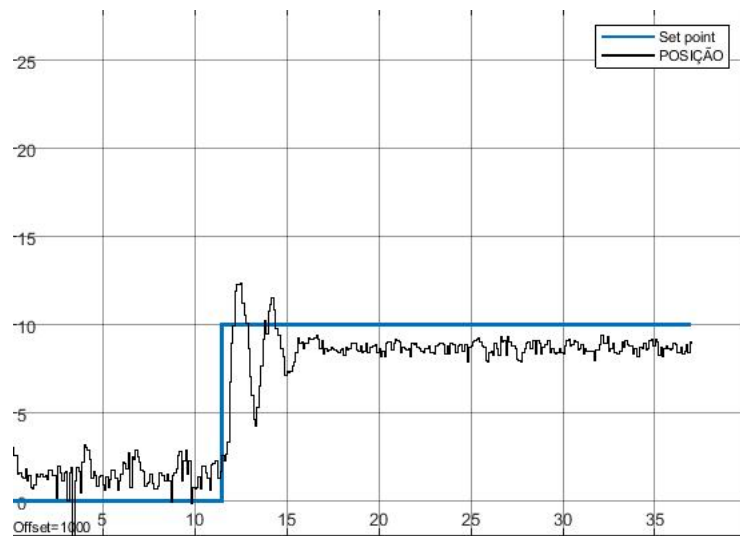
Figura 23: Modelo da planta virtual 3D.



Fonte: Autor, 2022.

Na Figura 24 é possível ver a resposta ao degrau da planta física usando apenas o controle proporcional obtido experimentalmente, onde foi mantido os termos Integral e Derivativo do PID em zero e variado apenas o termo Proporcional. Observa-se conforme esperado que o sistema estabiliza com um erro próximo de 20% quando comparado a posição da bola com o valor do *set point*.

Figura 24: Resposta ao degrau do modelo físico com controlador Proporcional.

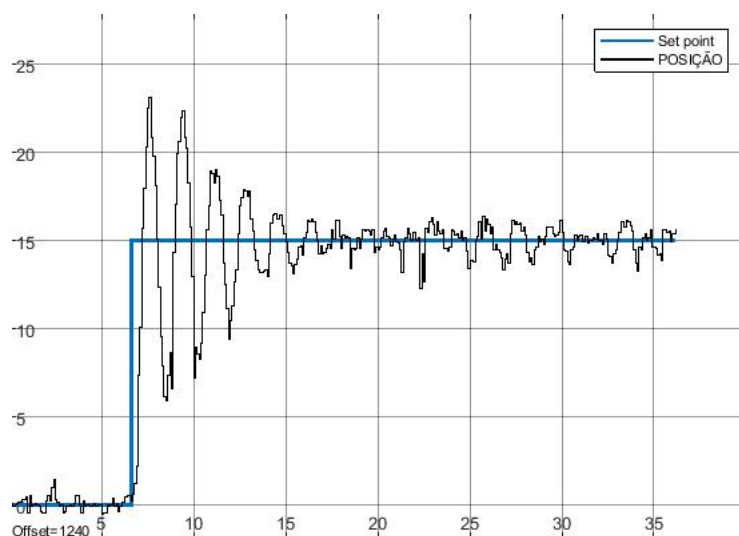


Fonte: Autor, 2022.

Na Figura 25 é possível ver a resposta ao degrau da planta física usando um controle Proporcional e Integral (PI) projetado experimentalmente, onde foi mantido o termo Derivativo em zero e variado os termos Proporcional e Integral até obter a resposta aceitável. Observa-se devido a adição do fator Integral que o sistema estabiliza sem erro, porém teve um aumento do regime transitório devido a inserção do fator Integral no controlador.

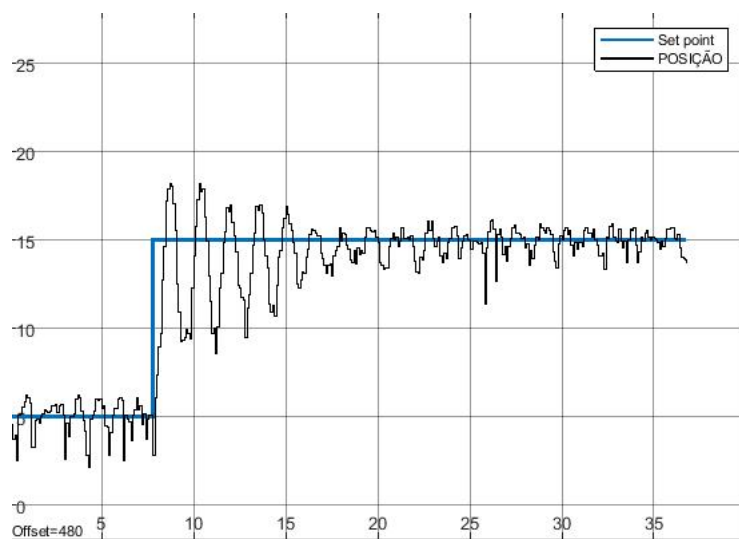
Na Figura 26 é possível ver a resposta ao degrau da planta física usando um controle Proporcional Integral e Derivativo (PID) projetado experimentalmente, onde foi variado os três termos até obter uma resposta ao degrau aceitável. Observa-se que o sistema estabiliza sem erro, com uma melhora no regime transitório devido a presença do termo Derivativo.

Figura 25: Resposta ao degrau do modelo físico com controlador PI.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 26: Resposta ao degrau do modelo físico com controlador PID.



Fonte: Autor, 2022.

Conforme Tabela 2 o valor total desse projeto ficou em R\$ 116,86, mas vale observar que o item 1 e 3 é comprado no metro, logo com uma compra é possível fazer mais de uma peça.

5 Conclusão

Nesse trabalho foi apresentado uma visão sobre alguns componentes eletrônicos e sobre controle PID. Preliminarmente foram realizadas descrições teóricas, apresentação das equações quando pertinente e a técnica de controle, e resultados de simulações.

A planta feita em tubo de PVC foi de fácil montagem, porém foi necessário uso de ferramentas elétricas tais como a serra mármore e a micro retífica para fazer os cortes. Vale deixar claro, que o foco principal do presente trabalho foi a montagem de uma planta de levitação de bola por ar de baixo custo para a prática de controle.

A planta virtual 3D feita no MATLAB® a partir do modelo barra bola do *plugin "Virtual Hardware and Labs for Controls"* facilitou o desenvolvimento da mesma.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

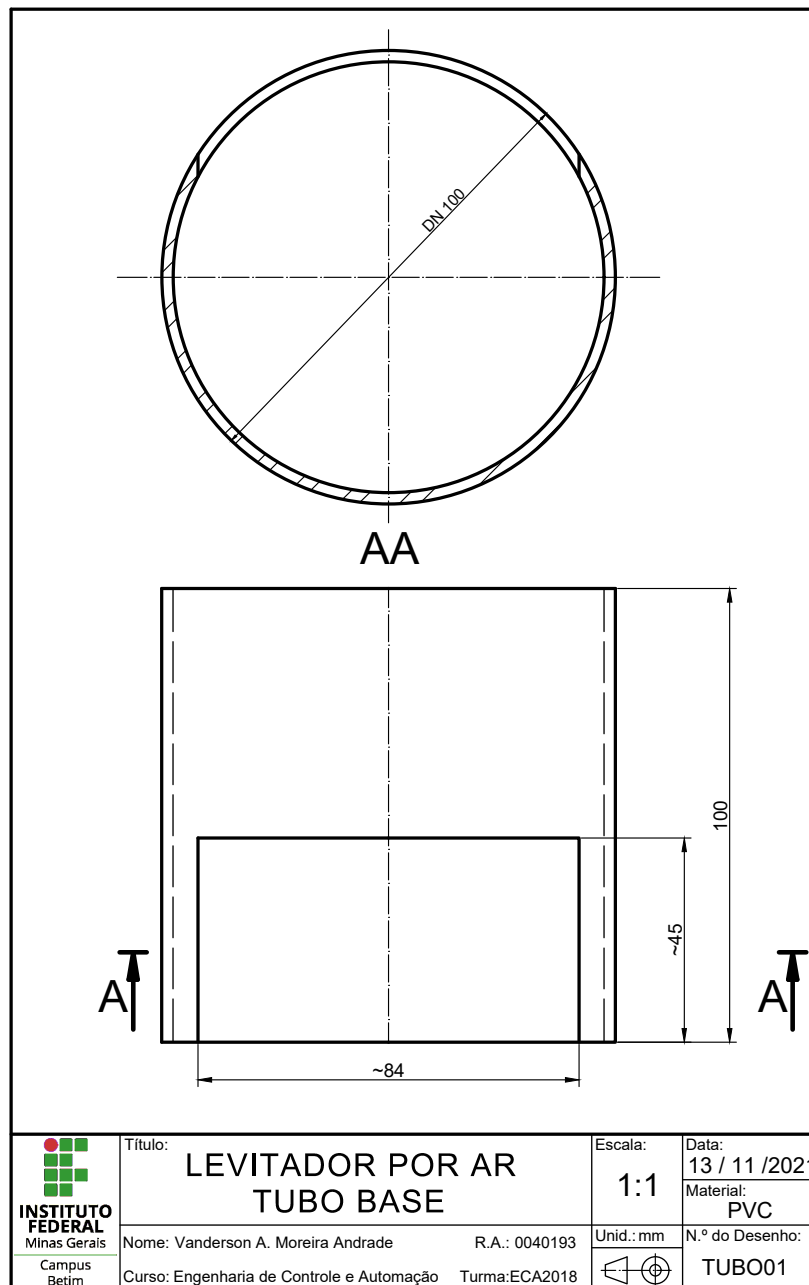
- Fazer uma comunicação da planta com *display Nextion* para que a interação com estudante seja feita por essa tela dispensando o uso de computador.
- Para o tubo item 3 da lista 1 usar algum material transparente de baixo custo.
- Prototipar a placa para montagem do transistor que controla o motor colocando bornes para conexão do motor e também colocar bornes para conexão do sensor ultrassônico.
- Construir a simulação 3D e as plantas físicas de outros protótipos como: placa e bola, pêndulo invertido, pêndulo duplo, pêndulo rotativo, dentre outros sistemas de baixo custo.
- Colocar um LED vermelho próximo do sensor ultrassônico para destacar o movimento da bola de isopor dentro do tubo.
- Fazer a modelagem considerando um tubo de área variável devido a velocidade do ar diminuir a medida que vai subindo, pois, parte do ar escapa pela lateral do tubo devido ao corte longitudinal.

Referências Bibliográficas

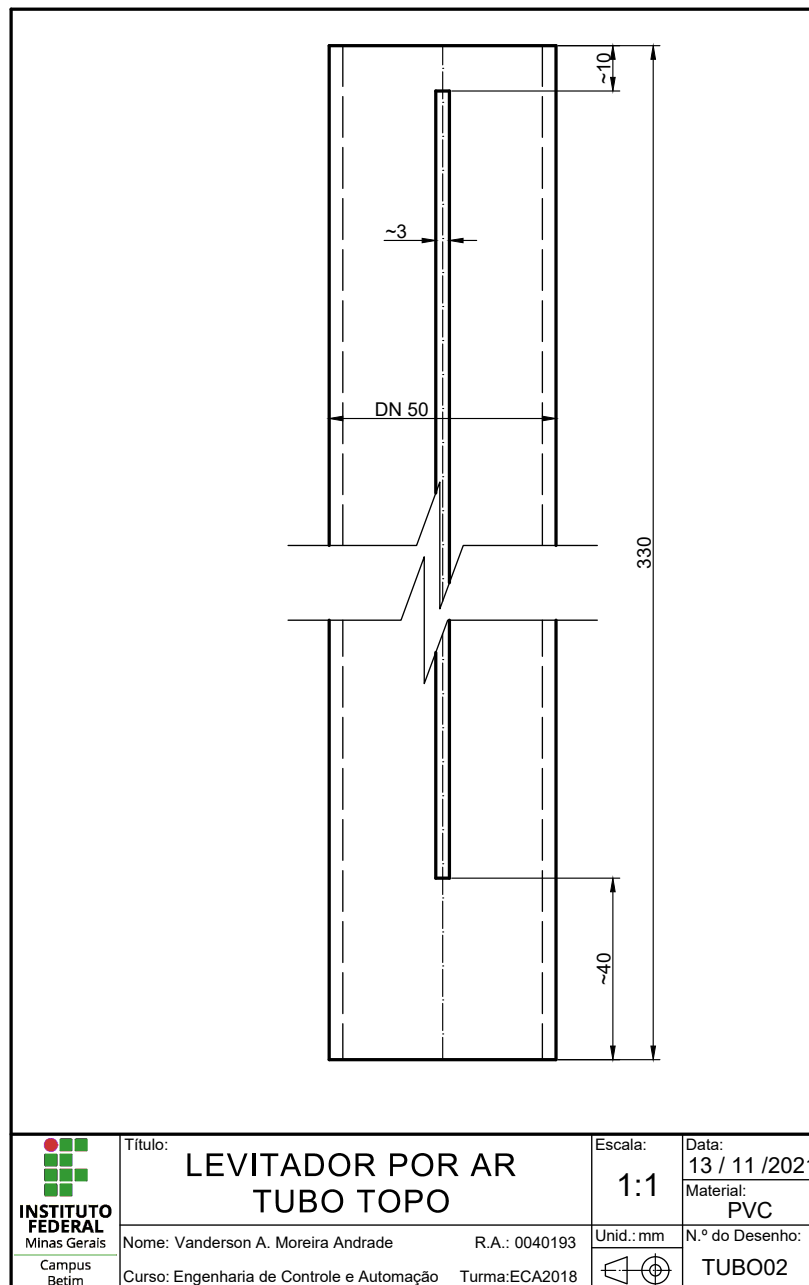
- [1] Brian Hong. "virtual hardware and labs for controls". Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/100064-virtual-hardware-and-labs-for-controls>. Acesso em: 10 de fevereiro 2022.
- [2] Elves Sousa e Silva, Juan Pereira Silva, Moisés Hamssés Sales de Sousa, and Ricardo Ferreira da Silva. Desenvolvimento de kit didático de controladores industriais aplicados ao controle de posição de válvula proporcional. *ETR Ensino e Tecnologia em Revista*, 4(1):68–78, 2020.
- [3] Taewoo Nam. Technology usage, expected job sustainability, and perceived job insecurity. *Technological Forecasting and Social Change*, 138:155–165, 2019.
- [4] Nikolai Siniak, Sergey Shavrov, Ninoslav Marina, and Karol Krajco. Examining the feasibility of industry 4.0 for the real estate sector with a lens of value and job creation. 2019.
- [5] Jos Moust, Peter Bouhuijs, and Hans Schmidt. *Introduction to problem-based learning*. Routledge, 2019.
- [6] David Moises Barreto dos Santos and Carlos Alberto dos Santos da Silva. Problem-based learning in a computer engineering program: Quantitative evaluation of the students' perspective. *IEEE Latin America Transactions*, 16(7):2061–2068, 2018.
- [7] S.S. Noureen, N. Shamim, V. Roy, and S.B. Bayne. Real-time digital simulators: A comprehensive study on system overview, application, and importance. *International Journal of Research and Engineering*, 4(11):266–277, 2017.
- [8] L.A. Grégoire, M. Cousineau, S.I. Seleme jr, and P. Ladoux. Real-time simulation of interleaved converters with decentralized control. In *ICREPCQ 2016. International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, pages 1–6, 2016.
- [9] Y. Li, X. Xu, X. Sun, H. Xue, H. Jiang, and Y. Qu. Theoretical and experimental analytical study of powertrain system by hardware-in-the-loop test bench for electric vehicles. *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, 12(1-2):44–71, 2017.

- [10] A. Fernández-Álvarez, M. Portela-García, M. García-Valderas, J. López, and M. Sanz. Hw/sw co-simulation system for enhancing hardware-in-the-loop of power converter digital controllers. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(4):1779–1786, 2017.
- [11] Elec Freaks. "ultrasonic ranging module hc - sr04". Disponível em: <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/HCSR04b.pdf>. Acesso em: 01 de fevereiro 2022, 2022.
- [12] Lynnette Reese. "the working principle, applications and limitations of ultrasonic sensors". Disponível em: <https://www.microcontrollertips.com/principle-applications-limitations-ultrasonic-sensors-faq/>. Acesso em: 12 de fevereiro 2022.
- [13] Luciano AE Silva, Ivan Barroso, Alexsander Menezes, Alessandro RL Zachi, Milena F Pinto, and Aurélio G Melo. Development of a control systems training module for application on undergraduate engineering classes. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 2, 2020.
- [14] João Viana da Fonseca Neto, Monik Silva Sousa, and Evandro Martins Araujo Filho. Controle de posição de um sistema de levitação pneumática. *Brazilian Journal of Development*, 6(6):40063–40076, 2020.
- [15] Michael McRoberts. *Arduino básico*. Novatec Editora, 2018.
- [16] Ogata K. *Engenharia de Controle Moderno*. Prentice-Hall, 2010.
- [17] Edinaldo Buschini. *Automatização e controle de uma planta didática*. 2018.

APÊNDICE A - Desenho Tubo DN 100 da Base do Levitador



APÊNDICE B - Desenho Tubo DN 50 do Topo do Levitador



APÊNDICE C – Base de Madeira do Levitador

