

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

CAROLINA RAMPASSO SOARES

**DESENVOLVIMENTO, ANÁLISE E CONTROLE DE UM MÓDULO
DE LEVITAÇÃO A AR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

CAROLINA RAMPASSO SOARES

**DESENVOLVIMENTO, ANÁLISE E CONTROLE DE UM MÓDULO
DE LEVITAÇÃO A AR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Ravazzi Pires da Silva

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia de Controle e Automação



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carolina Rampasso Soares

Desenvolvimento, análise e controle de um módulo de levitação a ar

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 18:00hs do dia 20/11/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia Elétrica 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). Emerson Ravazzi Pires da Silva - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - (Membro)

Engenheiro(a) Julio Yuzo Yassuda - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus e meus pais, Ricardo Ribeiro Soares e Janete Rampasso Soares, por terem incentivado, investido e acreditado em mim como ninguém o fez, e foi principalmente por meio deles que a realização do meu sonho foi possível.

Agradeço também à minha avó, Cacilda Capelasso Soares que me auxiliou grandemente de várias formas imagináveis, pois graças aos seus esforços pude completar a graduação.

Agradeço a todos os amigos incríveis que fiz durante minha formação, em especial Alexandre da Cruz Policarpo, que agora faz parte da minha família. Existem muitos outros que estão aqui em intenção, tanto pelo carinho quanto pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço também à professora doutora Carolina Ribeiro Rodrigues pelos conselhos e amizade inestimáveis, e por ter me ensinado a ver meu valor, pessoal e profissionalmente.

E por fim, agradeço ao meu orientador, professor doutor Emerson Ravazzi Pires da Silva, por ter iniciado e encerrado meu ciclo na Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Todas as palavras de incentivo, sabedoria e tranquilidade dirigidas a mim me acompanharão para o resto da vida.

RESUMO

SOARES, Carolina Rampasso. Desenvolvimento, análise e controle de um módulo de levitação a ar. 2020. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

Ao se estudar disciplinas de caráter totalmente teórico, torna-se custoso compreender a aplicação prática dos elementos ilustrados em sala de aula. Essa questão engloba também as disciplinas da área de controle dinâmico, associando-se ao fato que muitas universidades não possuem uma infraestrutura adequada para o aperfeiçoamento em laboratórios práticos, podendo prejudicar os alunos na compreensão total da aplicação dos conceitos vistos em sala de aula teórica. Desse modo, este trabalho consiste no projeto e construção de um módulo didático de levitação a ar de baixo custo relativo, onde a posição de uma bola, comumente de ping-pong, no interior de um tubo será controlada através de um fluxo de ar gerado por um motor de corrente contínua e o aferimento da posição é feito por meio da leitura de um sensor do tipo infravermelho. O módulo se comunica com um computador, acrescido do software MATLAB[®]/Simulink[®], mediante o uso da plataforma de prototipagem Arduino[®]. Por fim, diferentes projetos de controladores da família PID (Proporcional-Integral-Derivativo) são aplicados no módulo de levitação a ar para avaliar as respostas transitórias do sistema.

Palavras-chave: Módulo didático. Levitação a ar. Controle de posição. PID.

ABSTRACT

SOARES, Carolina Rampasso. Development, analysis and control of an air levitating module. 2020. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

When dealing with fully theoretic subjects, it becomes hard to comprehend the application of in-class studies. This also includes dynamic control subjects, due also to the fact that many universities do not have an adequate infrastructure to improve practical labs, and this might damage the students' understanding of such content. That being said, this work consists on projecting and constructing a relatively low cost air levitating didactic module, where a (commonly) ping-pong ball's positioning will be measured inside a tube, while being sustained through an air flow inside said tube. The measurement will be made by an infrared sensor, and the module itself communicates with a computer and the MATLAB[®]/Simulink[®] software through the Arduino[®] prototyping platform. After that, different PID (proportional–integral–derivative) controllers will be applied for transient response evaluation.

Keywords: Didactic module. Air levitation. PID.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de malha-fechada.	3
Figura 2 – Controle PID numa planta.	4
Figura 3 – Funcionamento de motores DC.	5
Figura 4 – Esquemático do protótipo.	6
Figura 5 – Módulo de levitação a ar.	7
Figura 6 – Suporte do sensor infravermelho.	8
Figura 7 – Placa Arduino [®] Mega 2560.	9
Figura 8 – Sensor SHARP [®] GP2Y0A21YK0F.	10
Figura 9 – Motor DC.	11
Figura 10 – Módulo de Fonte de Protoboard.	12
Figura 11 – Fonte colmeia.	12
Figura 12 – Programação em blocos no Simulink [®]	13
Figura 13 – Posição vertical da bolinha para C_P e referência de 15 cm.	15
Figura 14 – Posição vertical da bolinha para C_P e referência de 25 cm.	15
Figura 15 – Posição vertical da bolinha para C_P e referência de 30 cm.	16
Figura 16 – Posição vertical da bolinha para C_{PD} e referência de 15 cm.	17
Figura 17 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência de 15 cm.	18
Figura 18 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência de 25 cm.	19
Figura 19 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência de 30 cm.	20
Figura 20 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência do tipo degrau com variações nas amplitudes.	21
Figura 21 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência do tipo rampa.	22
Figura 22 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência do tipo onda quadrada.	23
Figura 23 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência do tipo senoidal.	24
Figura 24 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência de 15 cm.	25
Figura 25 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência de 25 cm.	26
Figura 26 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência de 30 cm.	27
Figura 27 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência do tipo degrau com variações nas amplitudes.	28
Figura 28 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência do tipo rampa.	29
Figura 29 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência do tipo onda quadrada.	30
Figura 30 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência do tipo senoidal.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Erros estacionários em termos do ganho de K	4
--	---

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Problema	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo Geral	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
2 – Fundamentação Teórica	3
2.1 Sistemas de Controle	3
2.1.1 Sistema de Malha-Fechada	3
2.1.2 Erro Estacionário	3
2.1.3 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)	4
2.2 Motor DC	5
2.3 Módulo de levitação a ar	6
2.3.1 Construção do protótipo	6
2.3.2 Chaveamento por PWM	8
3 – Materiais e Métodos	9
3.1 Placa de prototipagem Arduino®	9
3.2 Software MATLAB®/Simulink®	9
3.3 Sensor SHARP® GP2Y0A21YK0F	10
3.4 Motor de Corrente Contínua (DC)	10
3.5 Fonte para Protoboard YwRobot	11
3.6 Fonte Colmeia	12
4 – Resultados e Discussões	13
4.1 Controlador Proporcional (C_P)	14
4.2 Controlador Proporcional-Derivativo (C_{PD})	16
4.3 Controlador Proporcional-Integrativo (C_{PI})	17
4.4 Controlador Proporcional-Integrativo-Derivativo (C_{PID})	24
5 – Conclusões Finais	32
Referências	34

1 INTRODUÇÃO

Com o intenso avanço da tecnologia, aumenta-se cada vez mais a necessidade de otimizar suas funcionalidades com o intuito, por exemplo, de alcançar menores custos e aumentar a qualidade de produção. Tendo início no século XVIII, com a primeira máquina a vapor com velocidade regulável de James Watt, as técnicas de controle que antes eram apenas para sistemas mecânicos evoluíram para métodos cada vez mais sofisticados (OGATA, 2011). Atualmente, uma quantidade massiva de tecnologias conhecidas e popularizadas requerem algum tipo de controle, e estas não se restringem apenas à indústria - eletrodomésticos, aeronáutica e aeroespacial são áreas que recorrem ao controle de sistemas para criar equipamentos mais eficientes (NISE, 2012).

Visando uma forma de condensar esse conhecimento numa metodologia simples e dinâmica, foram desenvolvidos módulos didáticos para aplicações em laboratório, focando em estudo e pesquisa (SILVA et al., 2001). Desta forma, possibilitou-se um contato prático da teoria estudada, e uma visão sistêmica do projeto de diferentes controladores e seu impacto na resposta transitória de um sistema. Entre os módulos didáticos mais conhecidos estão, por exemplo, sistemas de controle de temperatura e os servomecanismos, possuindo uma variável a ser controlada de forma a se obter uma saída desejada mais próxima possível da esperada, de maneira didática e de funcionamento simples.

Porém, módulos didáticos profissionais encontrados em mercado possuem um custo de aquisição e manutenção muito elevado, fazendo com que as instituições de ensino optem por não adotar esse recurso (PEREIRA et al., 2014). Assim, o contato de estudantes com a prática de laboratório é reduzido, podendo prejudicar o desenvolvimento profissional do mesmo.

Tendo como prioridade a construção de um mecanismo com custo acessível e de funcionamento simples, um sistema de levitação a ar, apesar de não encontrado nas literaturas tradicionais, preenche todos os requisitos anteriores e traz uma dinâmica diferente dos módulos convencionais, tendo como objetivo o controle de um motor que gera um fluxo de ar para levantar uma bola na posição vertical (CHACON et al., 2017). Na literatura especializada é possível apreciar trabalhos que exploram o módulo supracitado, a título de exemplo em (CHACON et al., 2017; CHOŁODOWICZ; ORLOWSKI, 2017; CHRISTOPHER, 2018).

1.1 Problema

Comumente, as disciplinas da área de controle dinâmico são ministradas de forma majoritariamente teórica, seja por falta de infraestrutura adequada ou pelo custo elevado para aquisição de módulos didáticos e equipamentos para laboratório e suas respectivas manutenções (PEREIRA et al., 2014; GOMES et al., 2011). A falta de aprendizagem de conhecimento prático pode prejudicar o bom entendimento e progresso técnico do discente, dado os conceitos,

normalmente, abstratos ministrados em aula teórica que poderiam ser muito melhor fixados com a aplicação da teoria em experimentos reais.

1.2 Justificativa

Para o reforço do aprendizado, não é importante apenas o meio utilizado, mas um cenário que possibilite diferentes análises e aplicações de distintas estratégias de controle estudadas. Inúmeros módulos foram desenvolvidos para a prática de laboratório, sendo os mais comuns os modelos de controle de temperatura e servomecanismo. Entretanto, um contato com sistemas de diferentes funcionamentos e características pode gerar um know-how e uma abordagem distinta para o estudante, levando em consideração na elaboração do protótipo diversos procedimentos que podem ser aplicados para observar o funcionamento de seu sistema.

1.3 Objetivos

Nesta seção serão apresentados o objetivo geral e o objetivos específicos do trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho dado o problema exposto é construir, analisar e controlar um protótipo de um sistema de levitação a ar para fins didáticos.

1.3.2 Objetivos Específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Projetar e construir o módulo didático de levitação a ar;
- Implementar a comunicação entre o módulo e o software Matlab[®]/Simulink[®] por meio da placa de prototipagem Arduino[®]
- Aplicar técnicas de controle da família PID no módulo didático;
- Analisar a resposta transitória controlada do sistema.

2 Fundamentação Teórica

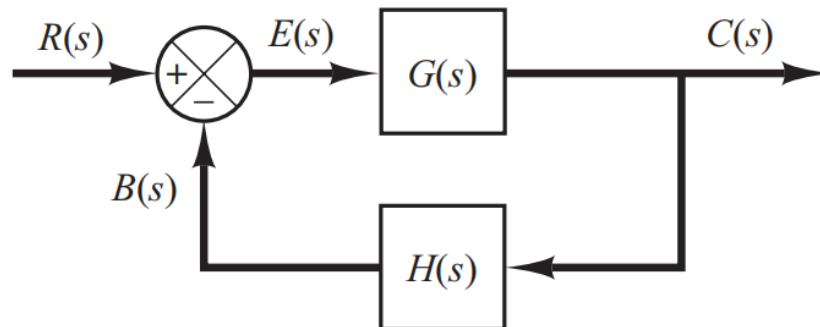
2.1 Sistemas de Controle

Numa interpretação objetiva, um sistema de controle é um conjunto de variáveis que, num determinado processo, trabalha em harmonia com a finalidade de seguir uma referência desejada (OGATA, 2011). O controle desse dito sistema é feito através da manipulação da dinâmica por meio destas variáveis (NISE, 2012). Os sistemas de controle podem ser em malha-aberta e em malha-fechada.

2.1.1 Sistema de Malha-Fechada

Sistemas de malha-fechada são os que possuem uma ramificação referente à realimentação. Nessa configuração, tem-se uma entrada $R(s)$ que passa por uma planta $G(s)$ de malha-aberta, e sua resultante é comparada com a entrada depois de passar por uma função $H(s)$ que pode ou não ser unitária (OGATA, 2011). Dessa forma, o sistema possui uma compensação para reduzir o erro estacionário $E(s)$, da saída $C(s)$. O diagrama de blocos de um sistema de malha-fechada está representado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema de malha-fechada.



Fonte: (OGATA, 2011)

2.1.2 Erro Estacionário

O erro estacionário ocorre quando, além da presença de imperfeições físicas que causem um funcionamento inferior ao ideal, o sistema não consegue seguir a referência do sinal de entrada (OGATA, 2011). Os sistemas físicos possuem erros para certos tipos de entrada. Isso ocorre conforme o grau de integração na função de transferência de malha-aberta, $G(s)$. Quando não há integrador, é denominado de Tipo 0, quando há apenas um, é de Tipo 1, e

assim por diante (OGATA, 2011). Na Tabela 1 está descrita a comparação entre as entradas e os tipos de sistema, de forma a mostrar o comportamento do erro estacionário.

Tabela 1 – Erros estacionários em termos do ganho de K .

	Entrada em degrau $r(t) = 1$	Entrada em rampa $r(t) = t$	Entrada em aceleração $r(t) = 0,5t^2$
Sistema do tipo 0	$\frac{1}{1 + K}$	∞	∞
Sistema do tipo 1	0	$\frac{1}{K}$	∞
Sistema do tipo 2	0	0	$\frac{1}{K}$

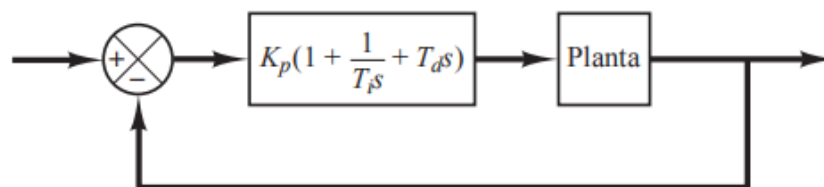
Fonte: (OGATA, 2011)

sendo que K representa genericamente as constantes referentes à cada entrada (posição, velocidade e aceleração). Ou seja, tem-se que quanto menor o tipo do sistema, maior sua sujeição a erros para entradas mais complexas, e que adicionar elementos integrativos causa a redução de erro no regime estacionário.

2.1.3 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

A principal utilidade desse tipo de controlador reside na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle, em particular, quando o modelo não é conhecido (OGATA, 2011). Isso torna o controle PID útil quando um projeto analítico apropriado não pode ser feito, mesmo que não signifique um controle ótimo. A Figura 2 exibe o diagrama de blocos de malha-fechada de um controlador PID atuando numa planta.

Figura 2 – Controle PID numa planta.



Fonte: (OGATA, 2011)

No esquema da Figura 2, tem-se a estrutura de um PID, onde K_p indica o ganho proporcional, T_i o tempo integral e T_d o tempo derivativo. A equação pode ser reescrita como

em (1).

$$C_{PID} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (1)$$

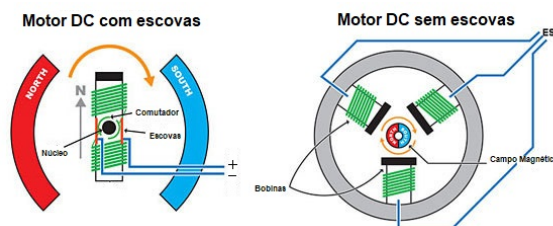
sendo que k_i representa agora o ganho integrativo e k_d o ganho derivativo. É comum realizar ajustes finos nos coeficientes de C_{PID} em plantas reais, visto que a variação de cada constante gera resultados distintos na dinâmica do sistema (*overshoot*, tempo de subida, tempo de assentamento, estabilidade e erro de regime). Tendo as propriedades desses ganhos como base, para o levitador foi feito o ajuste para a condição que melhor respondia às entradas diversas.

2.2 Motor DC

Os motores de corrente contínua (ou DC - *Direct Current*) têm seu funcionamento baseado nas forças de atração e repulsão eletromagnéticas geradas por ímãs em sua base. Convencionalmente, o motor possui um comutador que gira em seu próprio eixo, alimentado eletricamente por escovas de carbono em contato com a bobina. Quando a corrente passa pela bobina do comutador, o mesmo gera um campo magnético que dá início ao movimento do motor. A Figura 3 exibe o funcionamento de motores DC.

Existe um caso particular de motor DC chamado *brushless*, ou motores de ímã permanente, substituindo as escovas do estator. Nessa configuração não existe atrito entre base e rotor, e a rotação das bobinas é defasada em 120 graus para atrair e repelir campos eletromagnéticos específicos, fazendo com que o rotor gire (UMANS, 2014).

Figura 3 – Funcionamento de motores DC.



Fonte: <<http://www.electricalibrary.com/2017/10/10/motor-brushless/>>

Ambas as categorias de motores podem ser controladas usando um circuito para realizar o chaveamento de velocidade. Uma forma simples e eficiente de controlar o motor com escovas é através de *Pulse Width Modulation* (PWM). No caso do *brushless*, um ESC (*Electronic Speed Controller*, ou controlador eletrônico de velocidade) é necessário. O circuito de ESC por natureza apresenta uma construção mais complexa que o controle por chaveamento do motor DC convencional.

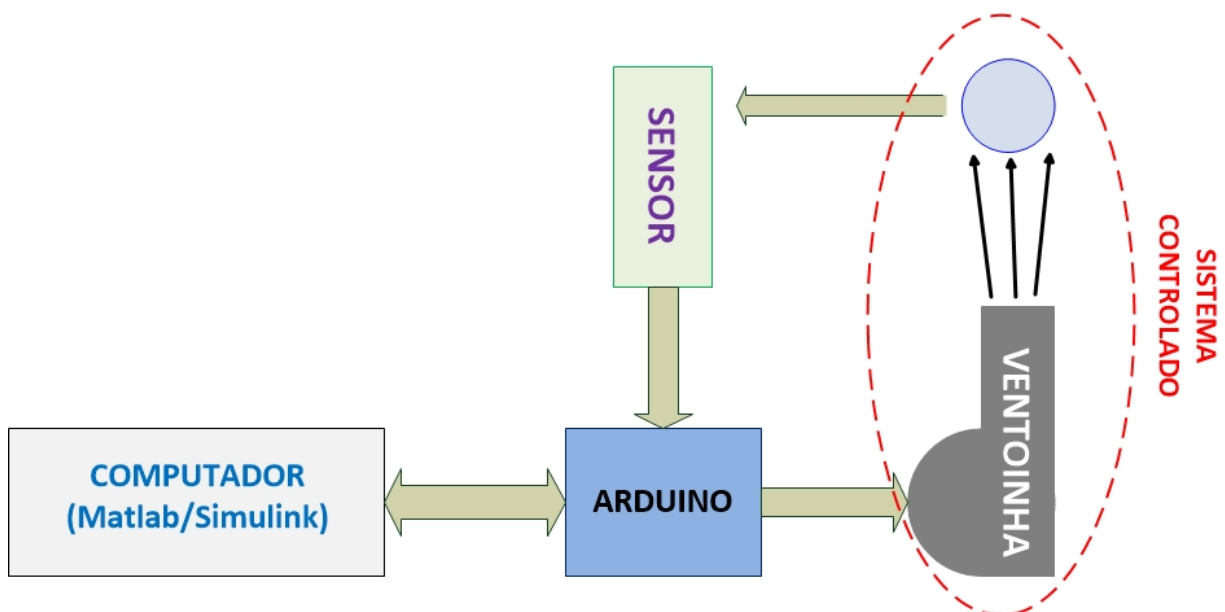
2.3 Módulo de levitação a ar

2.3.1 Construção do protótipo

O sistema de levitação a ar consiste de uma base de madeira quadrada com aberturas laterais para a entrada de ar, comportando um motor de corrente contínua com uma hélice (ventoinha) acoplada que gera um fluxo de ar constante e controlável dentro de um tubo vertical com aberturas laterais (neste projeto utilizou-se de um tubo de PVC). Dessa forma, uma bola branca, usualmente de ping-pong, é suscetível a levitar no interior do tubo buscando a menor oscilação possível, e sua posição é mensurada por um sensor SHARP do tipo infravermelho na extremidade superior desse tubo (CHOŁODOWICZ; ORLOWSKI, 2017). A cor da bola se mostrou importante nos experimentos, devido ao índice de refletância do sensor conforme indicado no seu *datasheet*.

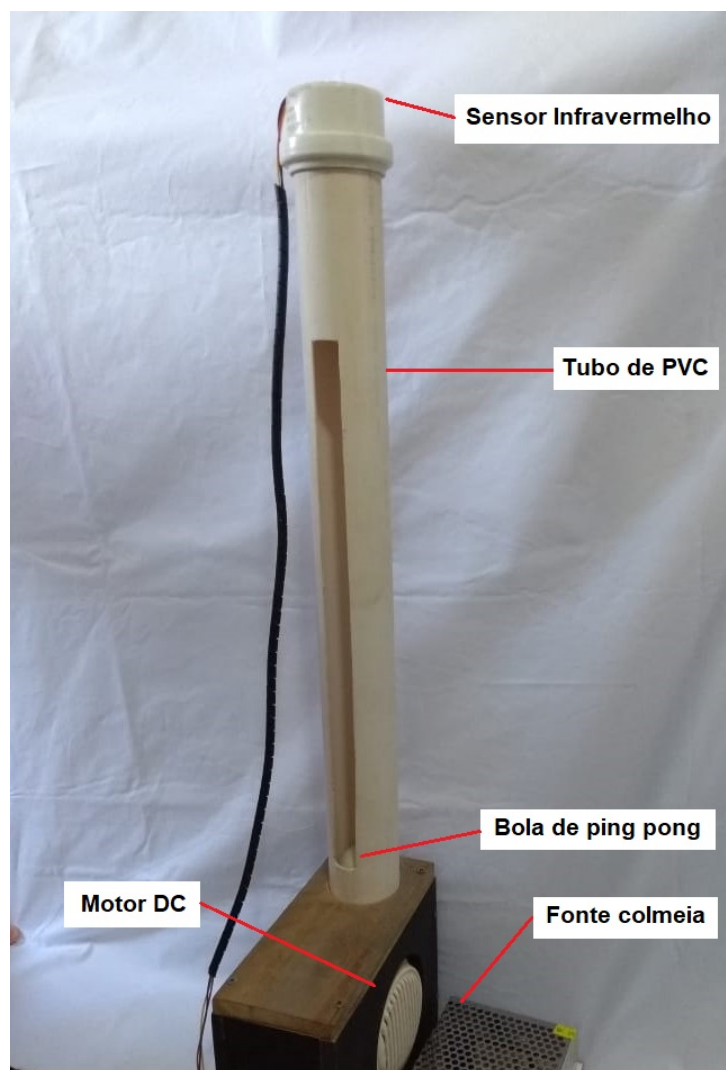
A leitura da posição vertical da bola é feita via sensor SHARP®, gerando o sinal de realimentação do sistema, e com base no setpoint (valor pré-determinado desejado de resposta) gera-se um sinal de erro que é processado pelo controlador que, por sua vez, envia um sinal de controle para aumentar ou diminuir a rotação do motor com hélice, de modo que a bola fique na altura pré-determinada. A comunicação entre o módulo e o computador com MATLAB®/Simulink® é realizada através da placa Arduino®. O esquemático pode ser observado na Figura 4 e o módulo final construído pode ser visto na Figura 5.

Figura 4 – Esquemático do protótipo.



Fonte: Adaptado de (CHRISTOPHER, 2018).

Figura 5 – Módulo de levitação a ar.



Fonte: Autoria própria.

Para este projeto, utilizou-se de um tubo de 45 centímetros de comprimento, para as medições foi desconsiderado a zona morta de 10 centímetros do sensor. As aberturas laterais, além do propósito de visualização, foram elaboradas por tentativa e erro para diminuir a intensidade do fluxo de ar na tentativa de reduzir a instabilidade do modelo. O sensor infravermelho foi fixado numa tampa de cano de PVC de 2 polegadas (mesmo diâmetro do tubo), também com aberturas para fins aerodinâmicos, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Suporte do sensor infravermelho.



Fonte: Autoria própria.

2.3.2 Chaveamento por PWM

Como já mencionado, os sinais são enviados ao software MATLAB[®] que, em conjunto com a ferramenta Simulink[®], realiza todo o processamento de dados, efetua a análise e gera o sinal de controle. A distância da bola é mensurada pelo sensor SHARP[®], o motor com hélice (atuador) é responsável por promover o fluxo de ar no interior do tubo vertical e a placa Arduino[®] é encarregada de fazer a comunicação entre sensor/atuador e computador (software). O circuito de chaveamento do PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) é composto por um transistor TIP122, juntamente com um resistor de 330Ω conectado ao Arduino[®] e ligado à sua base. O pino do coletor faz a interface com o motor DC e o emissor foi aterrado.

3 Materiais e Métodos

A seguir, descreve-se brevemente os materiais utilizados para a construção do módulo didático de levitação a ar.

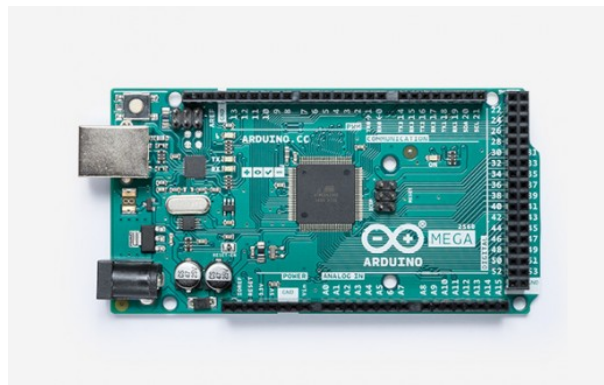
3.1 Placa de prototipagem Arduino®

A placa Arduino® é uma plataforma *open-source* de prototipagem eletrônica associada a um microcontrolador da linha Atmel, com o propósito de desenvolver sistemas embarcados de forma bastante simples, para fins educativos ou profissionais. É possível trabalhar com valores digitais e analógicos, e sua aplicabilidade abrange uma vasta gama de sensores, módulos e motores que são compatíveis com sua tecnologia.

Na construção do protótipo utiliza-se desta plataforma, cujas principais tarefas serão a de comunicação serial entre o computador, a aquisição da leitura do sensor infravermelho e atuação na velocidade do motor DC.

Para o projeto, foi selecionado o Arduino® Mega 2560, vide Figura 7, por ser um modelo popular com uma capacidade de processamento maior que a do Arduino® Uno (MARCHESAN, 2012). A interação entre o Arduino® e o software MATLAB®/Simulink® é de realização fácil por sua simplicidade quando comparada a outras placas de aquisição.

Figura 7 – Placa Arduino® Mega 2560.



Fonte: <<https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>>

3.2 Software MATLAB®/Simulink®

O MATLAB® (*MATrix LABoratory*) é um software de alta performance desenvolvido para realizar cálculos com matrizes. Por possuir uma sintaxe simples para realizar suas operações e uma grande variedade de extensões (*toolboxes*), o MATLAB® é amplamente usado por estudantes das mais diversas áreas.

A ferramenta Simulink[®] é uma extensão que realiza modelagem e simulação de sistemas dinâmicos por meio de diagrama de blocos, podendo ser usado para estudo de teoria de controle, processamento digital de sinais, dentre outros (ALUR et al., 2007). Essa ferramenta será utilizada para realizar a comunicação entre o protótipo e o computador, via Arduino[®], bem como executar todo o sistema de controle.

3.3 Sensor SHARP[®] GP2Y0A21YK0F

O SHARP[®], veja Figura 8, é um sensor infravermelho para medição de distâncias, possuindo uma faixa de leitura que varia de 10 a 80 centímetros. É composto por dois LEDs, um para emissão do feixe de luz infravermelho e outro para receber o sinal (ALCÂNTARA et al., 2013). O cálculo da distância é feito através do método da triangulação, o que garante uma boa precisão dos valores adquiridos.

Figura 8 – Sensor SHARP[®] GP2Y0A21YK0F.



Fonte:

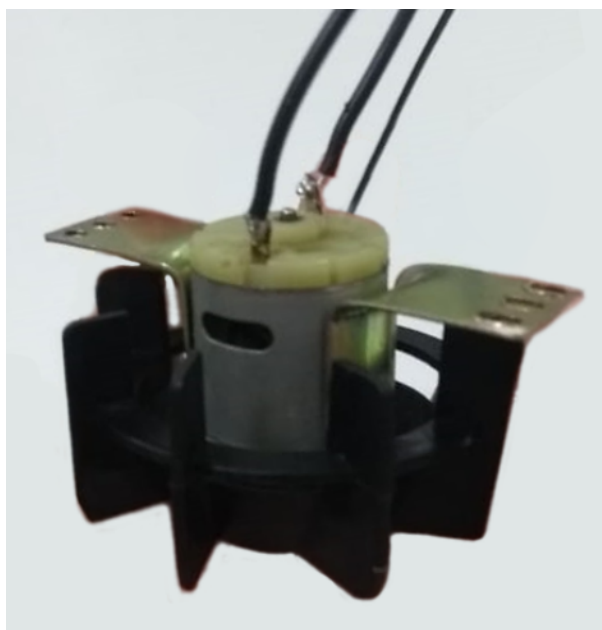
<<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/412635/SHARP/GP2Y0A21YK0F.html>>

O sensor possui tensão de operação entre 4,5 e 5,5 volts e consumo máximo de 30mA, conforme o *datasheet*.

3.4 Motor de Corrente Contínua (DC)

Inicialmente, foi escolhido para o projeto um motor do tipo *brushless*, mas, por possuir uma rotação muito alta sua operação gerava um forte ruído sonoro. Além disso, o mesmo apresentava uma potência elevada, se mostrando maior que a necessária para o protótipo. Sendo assim, após uma investigação, este foi substituído por um motor de corrente contínua comum com escovas, readaptado de um secador de cabelos, de especificações técnicas desconhecidas. Após alguns testes e observações, foi identificado que o mesmo opera numa tensão de 12V. O motor utilizado pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Motor DC.



Fonte: Autoria própria.

Diferentemente do que identificado no motor *brushless*, este motor possui uma resposta linear às variações de corrente, facilitando o desenvolvimento e a implementação de uma estratégia de controle. Por se tratar de um motor de corrente contínua simples, este pode ter seu comportamento controlado por meio de um sinal PWM, facilmente implementado pelo MATLAB[®]/Simulink[®].

3.5 Fonte para Protoboard YwRobot

O módulo de fonte da empresa YwRobot fornece a energia necessária para o sensor SHARP[®], capaz de alimentá-lo com até 700mA de corrente, tanto com 3,3V quanto 5V, segundo o *datasheet* do fabricante. Este módulo foi escolhido por ser uma alternativa compacta e barata, ideal para alimentar circuitos ou componentes controlados pelo Arduino[®]. Isso se deu pois a placa não forneceu corrente suficiente para alimentar o sensor e enviar o sinal PWM para o motor. A fonte YwRobot pode ser observada na Figura 10.

Figura 10 – Módulo de Fonte de Protoboard.



Fonte: <<http://www.bosontreinamentos.com.br/eletronica/modulo-de-fonte-para-matriz-de-contatos-ywrobot-analise>>

3.6 Fonte Colmeia

Para a alimentação do motor optou-se por utilizar uma fonte chaveada do tipo colmeia. Esta fonte fornece 12V de tensão e até 10A de corrente, sendo mais que suficiente para gerar a potência necessária para a execução do projeto. A fonte colmeia usada pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 – Fonte colmeia.



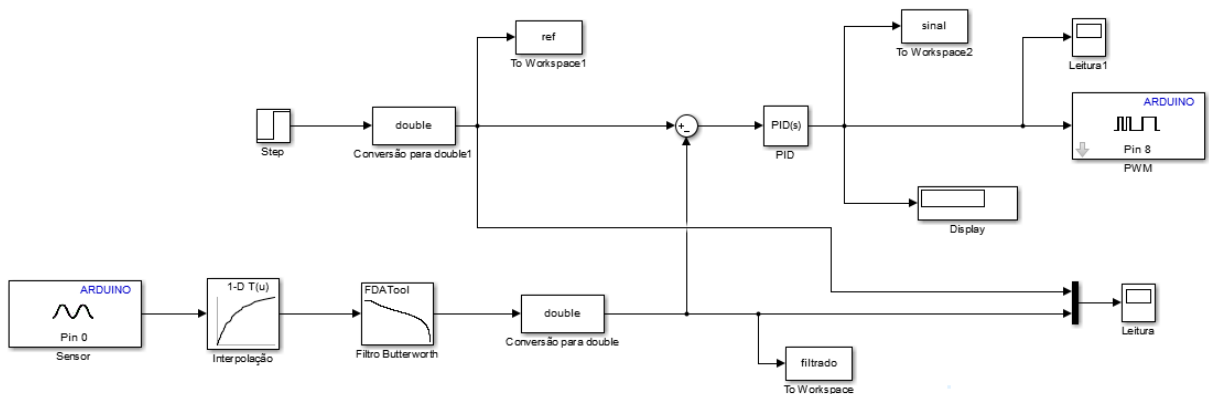
Fonte: Autoria própria.

4 Resultados e Discussões

Uma vez com o protótipo projetado e construído, iniciaram-se as análises e testes para verificar o comportamento do sistema. Não foi possível extrair uma curva transitória de malha-aberta, pois o módulo apresentou uma dinâmica bastante oscilatória e de natureza instável, mesmo utilizando uma excitação de entrada do tipo degrau - a proporcionalidade entre as variações de tensão e a leitura da altura não era mantida. Variações bruscas na saída causavam instabilidade, e variações vagarosas praticamente não causavam mudança alguma. Desse modo, todas as análises transitórias foram realizadas considerando o sistema em malha-fechada.

Considerando o tubo de PVC utilizado, foi definida uma altura operacional de 35 centímetros, limitando o intervalo atuante entre 10 e 45 centímetros, assim, criou-se uma parametrização da leitura do sensor no bloco “*Lookup Table*” do Simulink®, de acordo com as médias dos valores analógicos obtidos em experimentos práticos. A programação em blocos Simulink® empregada para a execução do sistema em malha-fechada está disposta conforme a Figura 12.

Figura 12 – Programação em blocos no Simulink®.



Fonte: Autoria própria.

Neste processo, o sinal de leitura do sensor SHARP® chega pelo pino analógico A0 do Arduino® com um tempo de amostragem de 0.01 segundos, passa pelo bloco de interpolação e por um filtro digital *Butterworth* de segunda ordem, gerado pelo bloco “*Digital Filter Design*”, com frequência de corte de 50 Hertz. Optou-se por utilizar esse filtro para eliminar o ruído branco que é natural do sensor SHARP®, e a ordem foi ajustada de forma a suavizar os picos de leitura e atrasar a leitura o mínimo possível. Dois blocos de conversão de unidade para *double* foram usados apenas para manter a compatibilidade de informação ao longo da execução. O bloco do controlador PID recebe o sinal de erro, computa e envia o sinal de controle para o pino de PWM. O sinal de controle, em PWM, possui um registrador de 8-bits, assim, seu valor

vai de 0 até 255, em que 0 representa 0% de *duty cycle* e 255 representa 100%. Logo, no chaveamento de tensão, o *duty cycle* varia proporcionalmente, i.e., 0% de *duty cycle* equivale a 0 volts e 100% a 12 volts, de acordo com a resolução.

Para observar a resposta transitória controlada, diferentes referências (*setpoint*) foram usadas para diferentes controladores da família PID (OGATA, 2011; NISE, 2012). Como não foi realizada a modelagem e identificação do sistema, os ganhos dos controladores são de natureza empírica, i.e., projetados a partir de diversos testes exaustivos no módulo. Inicialmente, foi projetado um controlador somente do tipo Proporcional, C_P , tal que:

$$C_P = k_p = 8,0 \quad (2)$$

Em seguida, um controlador do tipo Proporcional-Integrativo, C_{PI} , foi projetado:

$$C_{PI} = k_p + \frac{k_i}{s} = 3,0 + \frac{1,3}{s} \quad (3)$$

Na sequência, um controlador Proporcional-Derivativo, C_{PD} , foi sintetizado:

$$C_{PD} = k_p + k_d s = 3,0 + 1,3s \quad (4)$$

E, por fim, um controlador Proporcional-Integrativo-Derivativo, C_{PID} :

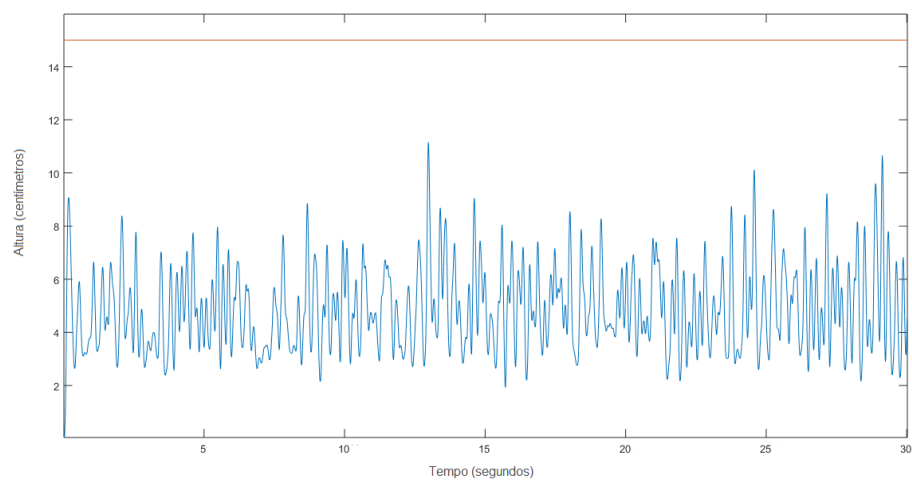
$$C_{PID} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = 1,2 + \frac{5,0}{s} + 0,2s \quad (5)$$

Foram geradas várias respostas transitórias de malha-fechada, considerando como saída controlada a posição vertical da bolinha, para fins de comparação e verificação do desempenho dos controladores projetados, as implementações têm duração de 30 e 50 segundos, conforme organizado nos tópicos a seguir. Para o controle proporcional utilizou-se apenas a leitura do sensor em centímetros, mas para os outros foram utilizadas as leituras do sinal de controle do PWM.

4.1 Controlador Proporcional (C_P)

Para o ganho $k_p = 8,0$, foram feitas três implementações práticas, considerando uma entrada do tipo degrau de amplitudes 15, 25 e 30 centímetros. A Figura 13 mostra a resposta transitória para a referência de 15 centímetros.

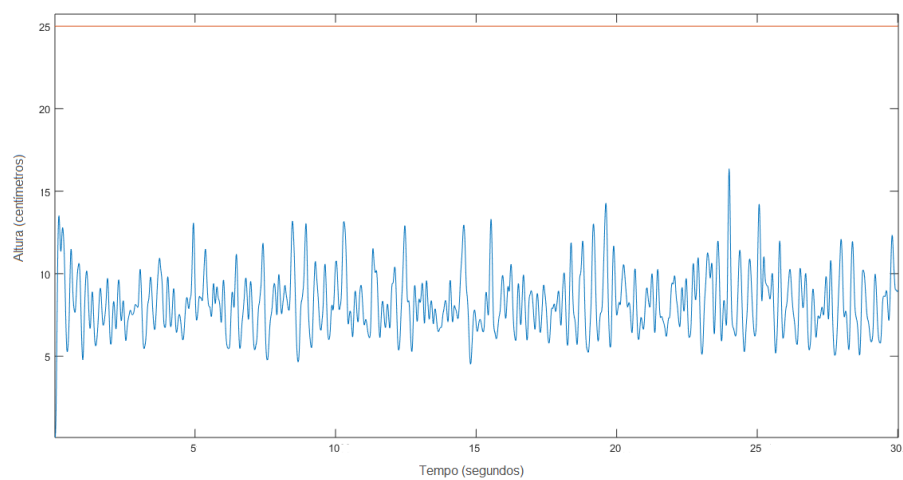
Figura 13 – Posição vertical da bolinha para C_P e referência de 15 cm.



Fonte: Autoria própria.

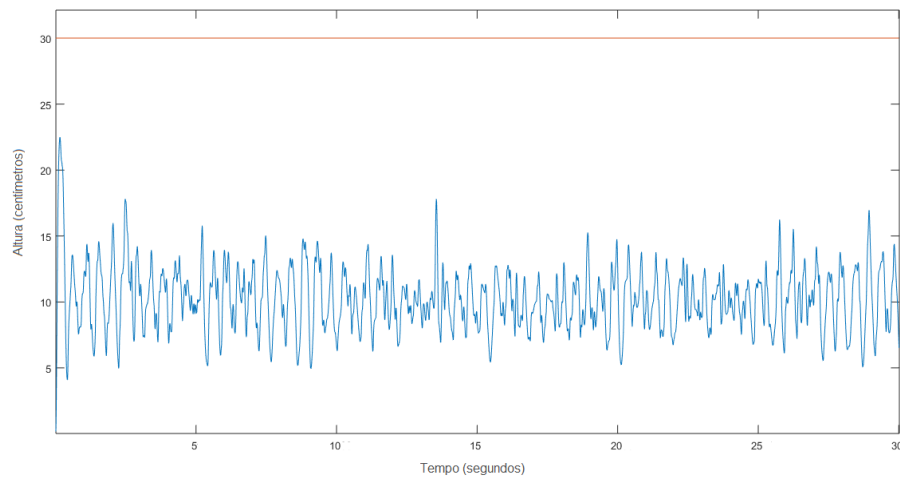
As Figuras 14 e 15 exibem as saídas controladas com as referências de 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Figura 14 – Posição vertical da bolinha para C_P e referência de 25 cm.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Posição vertical da bolinha para C_P e referência de 30 cm.



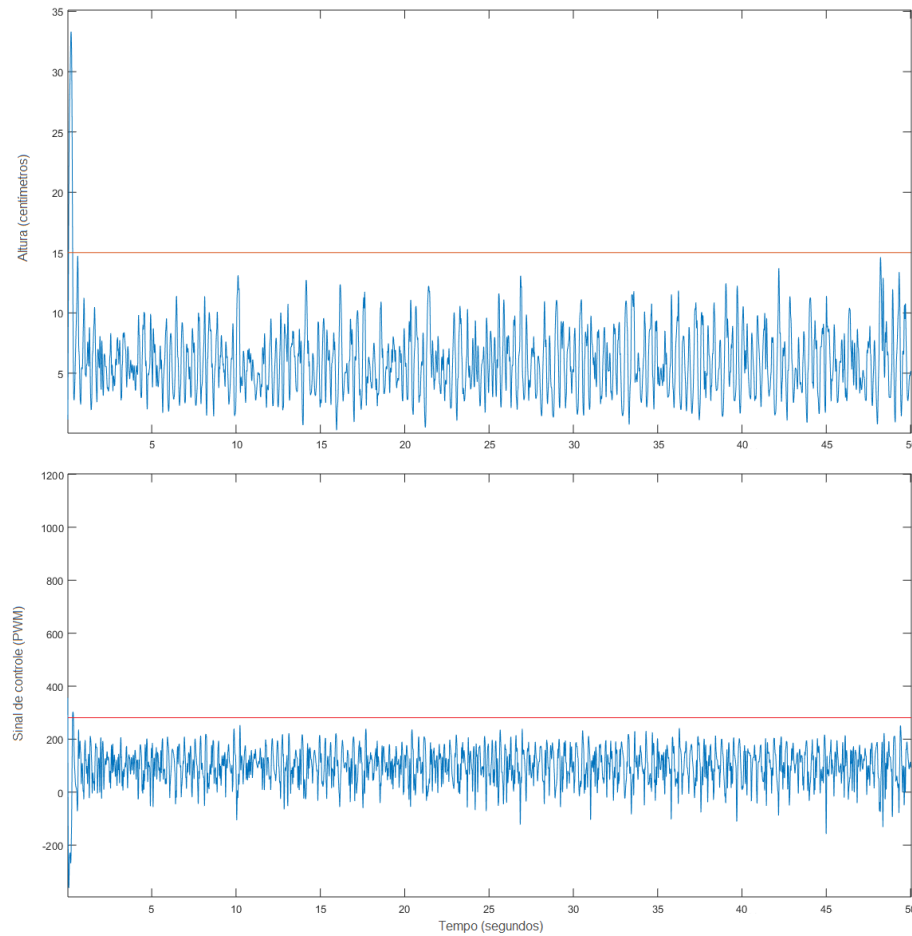
Fonte: Autoria própria.

Pelas respostas, é possível observar que a saída controlada, além de evidenciar oscilações abruptas, apresenta erro de regime permanente, caracterizando, por exemplo, que a planta de malha-aberta é do tipo 0. Nenhum dos experimentos seguiu a referência, mas a variação da resposta foi proporcional à variação da altura do degrau.

4.2 Controlador Proporcional-Derivativo (C_{PD})

Após vários ensaios, a saída do sistema considerando $k_p + k_d s = 3,0 + 1,3s$ se mostrou altamente oscilatória. Assim, não foi possível extrair mais de uma resposta, além do transitório de referência 15 centímetros, pois a variação era extremamente grande e a bolinha muitas vezes se mantinha na extremidade máxima do tubo, invalidando a leitura do sensor infravermelho. Na Figura 16 se encontram a leitura da posição vertical da bolinha e abaixo o sinal de controle.

Figura 16 – Posição vertical da bolinha para C_{PD} e referência de 15 cm.

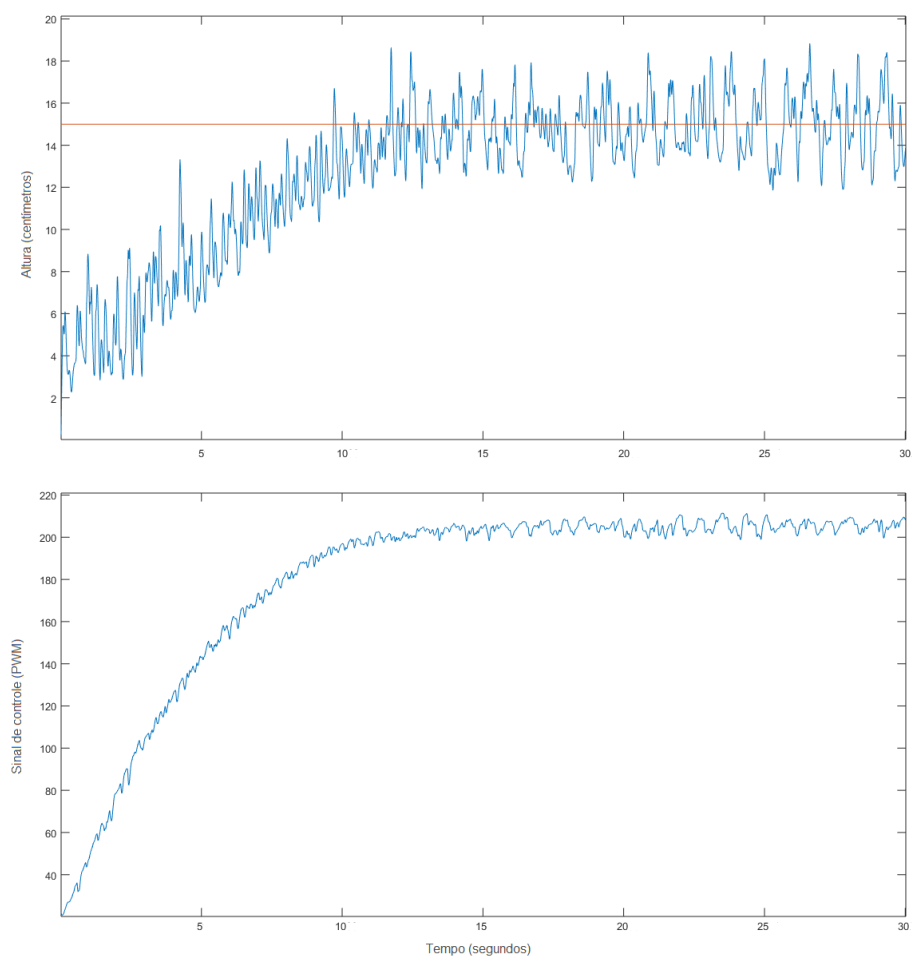


Fonte: Autoria própria.

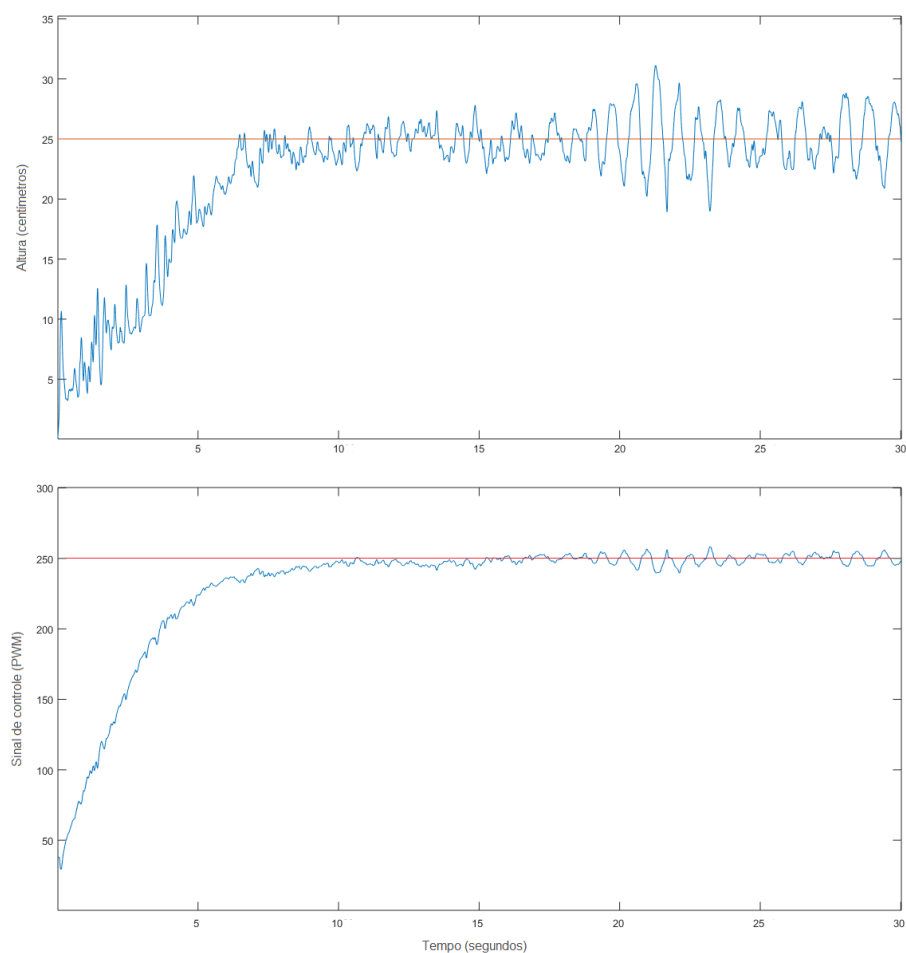
Novamente, pela resposta, é visível a rápida estabilização, existência de oscilações severas e a presença de erro de regime permanente. Com o objetivo de eliminar o erro transitório, na próxima seção será implementado um controlador do tipo PI.

4.3 Controlador Proporcional-Integrativo (C_{PI})

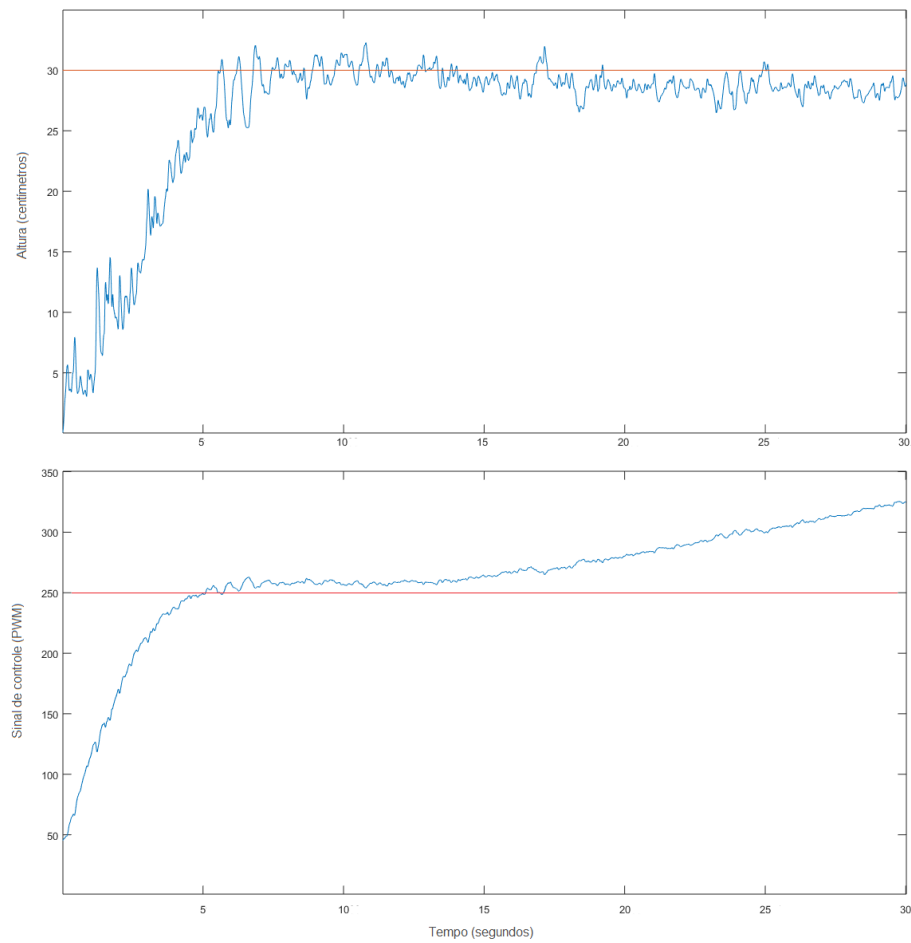
Por apresentar um comportamento mais estável e com menos oscilações que o projeto com C_{PD} , foram geradas no total sete implementações práticas, sendo três para entradas do tipo degrau (referências de 15, 25 e 30 centímetros), uma para entrada do tipo degrau com variações nas amplitudes, uma para entrada do tipo rampa, uma para entrada tipo onda quadrada e, por último, uma para entrada senoidal. As Figuras 17, 18 e 19 exibem as respostas controladas e seus respectivos sinais de controle.

Figura 17 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência de 15 cm.

Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência de 25 cm.

Fonte: Autoria própria.

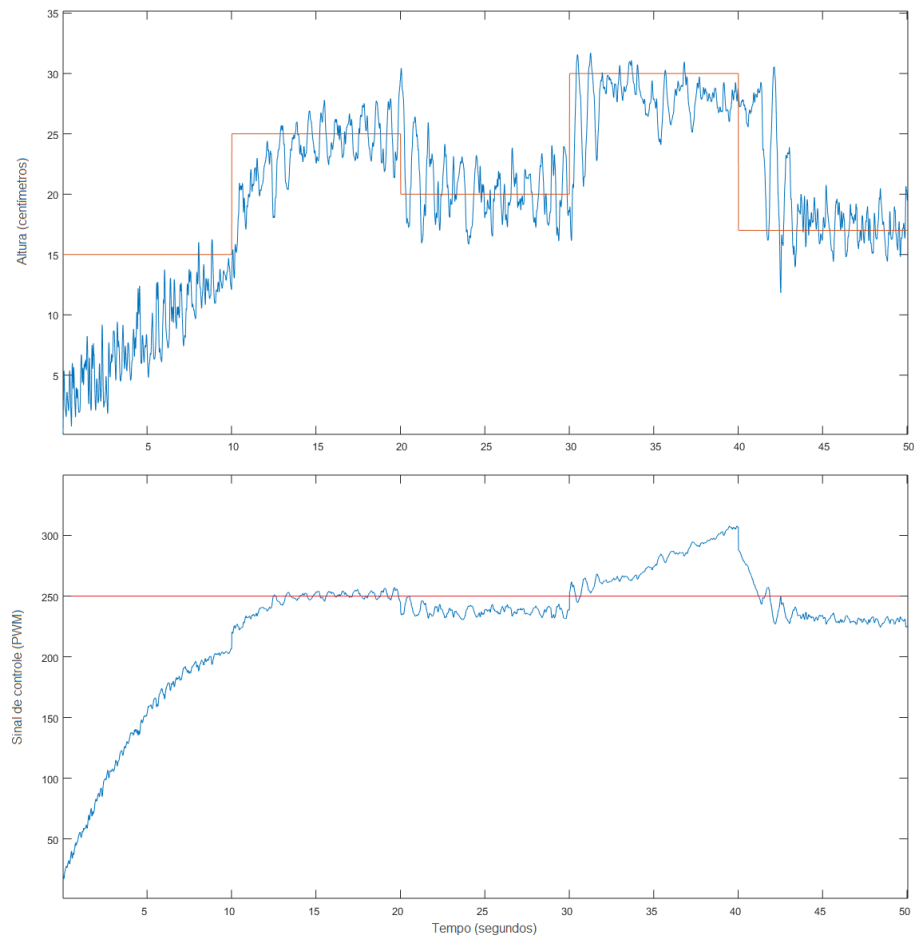
Figura 19 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência de 30 cm.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 19 é possível notar que o sinal de controle ultrapassa o valor máximo de 255 (100% de *duty cycle*) na tentativa de eliminar o erro de regime. Todavia, o erro permanece pois o motor já está em sua capacidade máxima de atuação, porém insuficiente para atingir o valor final desejado. O mesmo comportamento se repete em algumas outras implementação, dependendo do tipo de entrada e valor da amplitude.

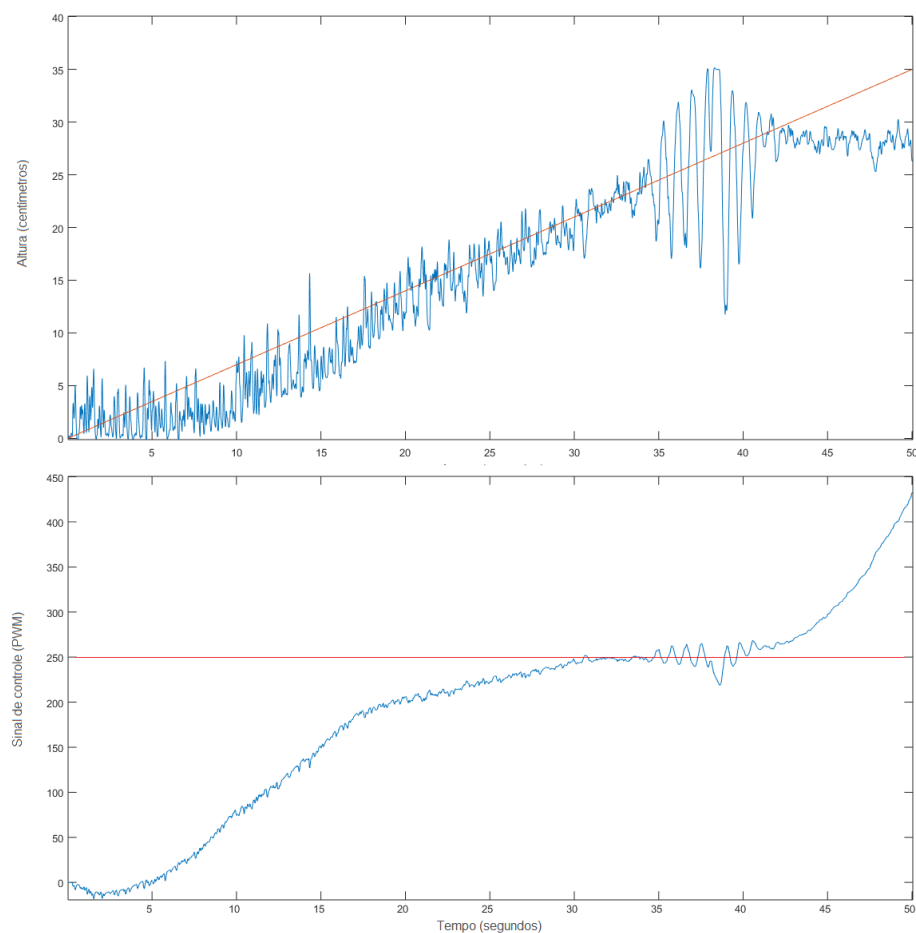
Na Figura 20 consta a resposta para a entrada do tipo degrau com variações nas amplitudes, alternando a cada 10 segundos entre 15, 25, 20, 30 e 17 centímetros, e o correspondente sinal de controle.

Figura 20 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência do tipo degrau com variações nas amplitudes.



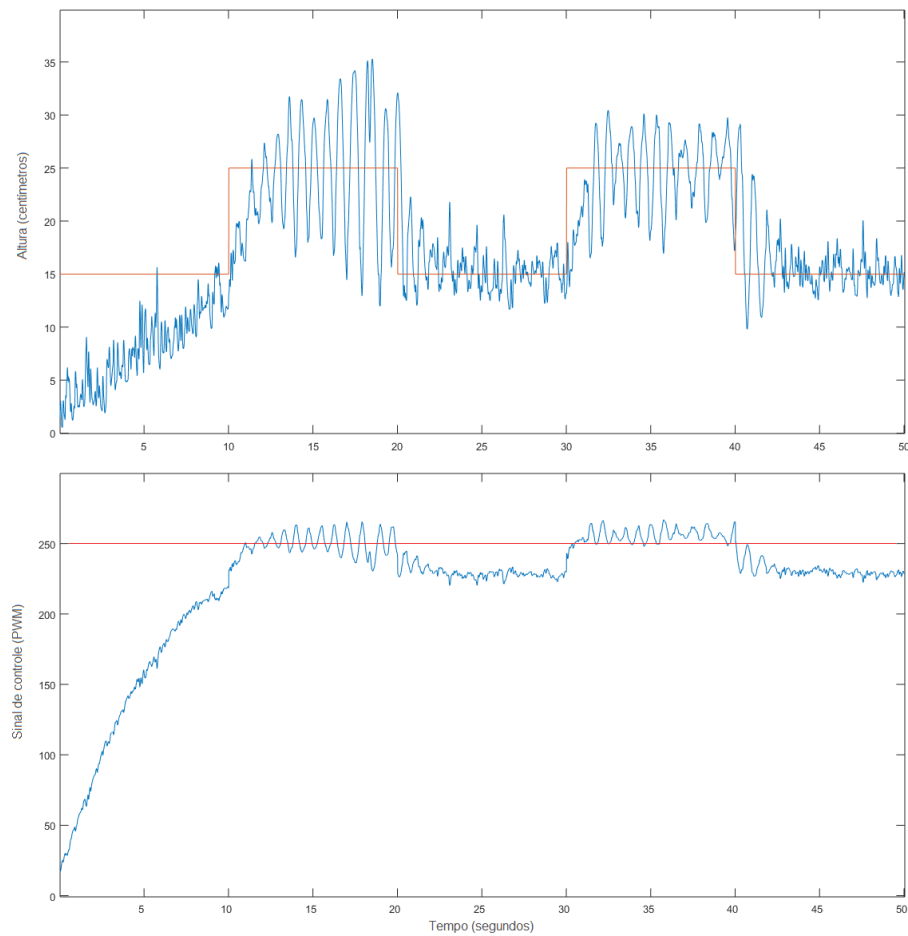
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 21, uma entrada em rampa é utilizada como referência, iniciando-se em 0 e terminando em 35 centímetros ao final da implementação, com razão de 0,70. O sinal de controle está presente na mesma figura. Nota-se que o sinal de controle aumenta indefinidamente, já que o sistema atinge a saturação abaixo da referência.

Figura 21 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência do tipo rampa.

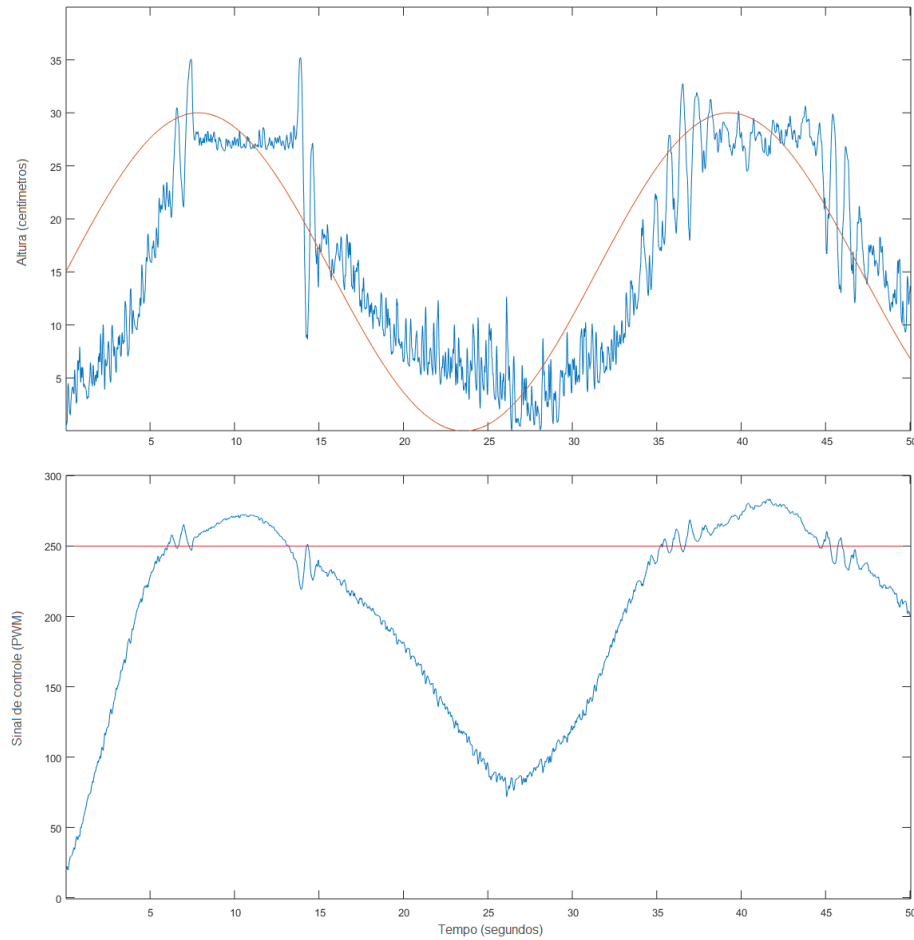
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 22, uma entrada do tipo onda quadrada é aplicada como referência, alternando regularmente a cada 10 segundos entre o nível baixo de 15 cm e o nível alto de 25 cm. Na própria figura abaixo inclui-se o sinal de controle.

Figura 22 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência do tipo onda quadrada.

Fonte: Autoria própria.

Por fim, optou-se por acionar uma entrada do tipo senoidal de amplitude mínima 0 e máxima de 30 centímetros, conforme a resposta da Figura 23. Na mesma imagem é possível observar o sinal de controle.

Figura 23 – Posição vertical da bolinha para C_{PI} e referência do tipo senoidal.

Fonte: Autoria própria.

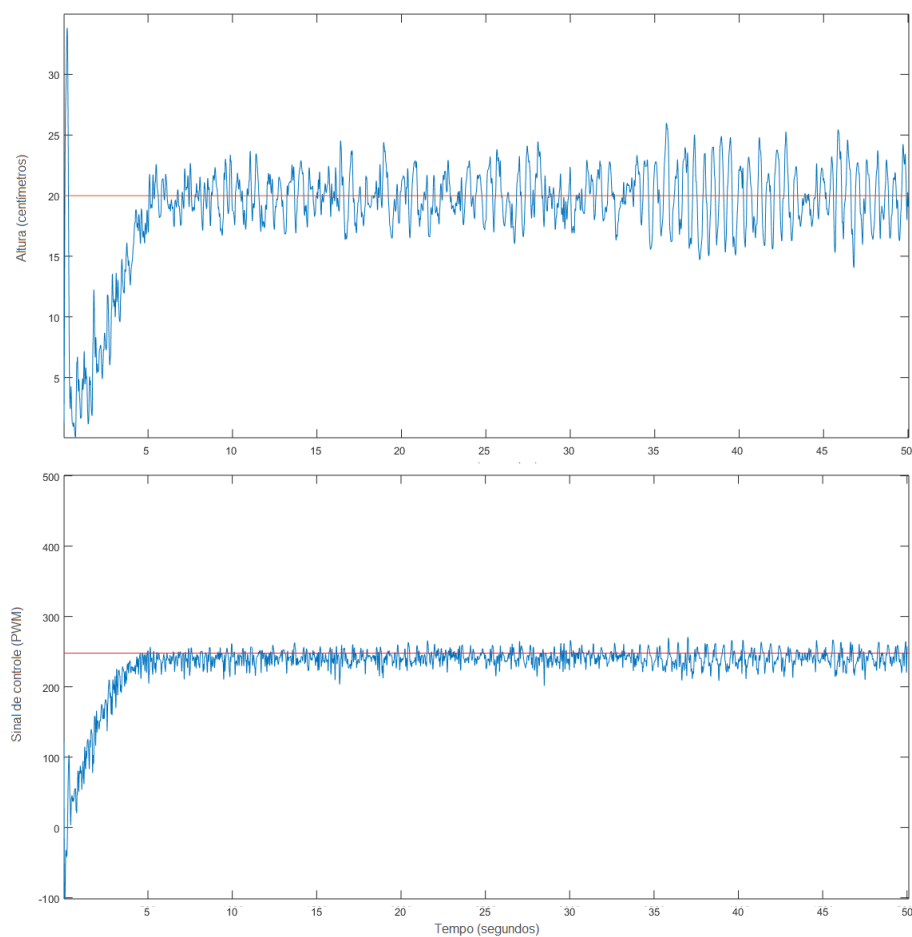
Analisando as respostas transitórias obtidas de malha-fechada, a princípio considerando as referências de características degrau, é possível observar que o controlador $C_{PI} = k_p + \frac{k_i}{s} = 3,0 + \frac{1,3}{s}$ projetado foi capaz de reduzir significativamente o erro de regime permanente, inicialmente verificado nas aplicações dos controladores C_P e C_{PD} . Ainda, em alguns casos, a atenuação das oscilações ocorre de modo considerável, por exemplo, veja a resposta da Figura 19. Como esperado, a saída do tipo rampa apresenta um pequeno erro de regime permanente, e do tipo senoidal apresenta um ganho de amplitude e defasagem na resposta.

4.4 Controlador Proporcional-Integrativo-Derivativo (C_{PID})

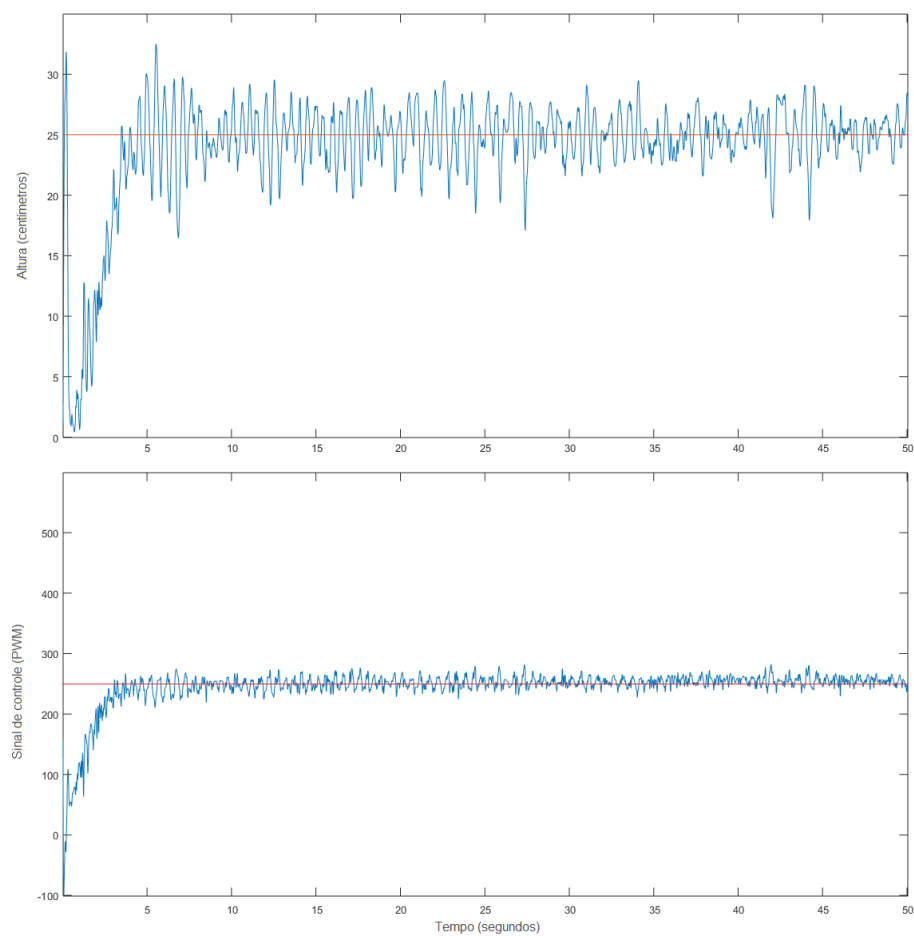
Semelhantemente ao C_{PI} , o controlador C_{PID} apresentou um desempenho bem mais consistente e regular, quando comparado com os controladores C_P e C_{PD} . Com a intenção de comparação com os resultados gerados pelo controlador C_{PI} , as mesmas referências da Seção 4.3 foram aplicadas no módulo, ou seja, foram efetuados no total sete implementações práticas.

As Figuras 24, 25 e 26 exibem as respostas controladas para as entradas em degrau de amplitudes 20, 25 e 30 centímetros, e seus respectivos sinais de controle.

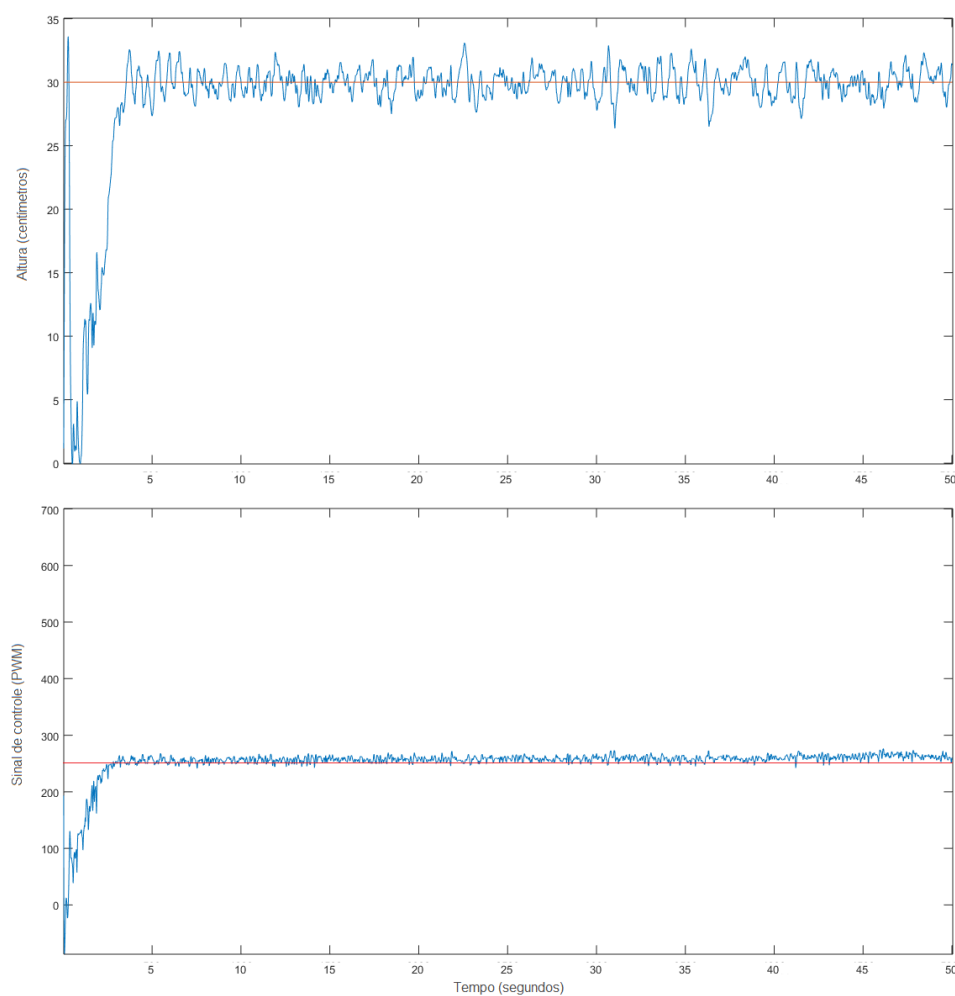
Figura 24 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência de 15 cm.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência de 25 cm.

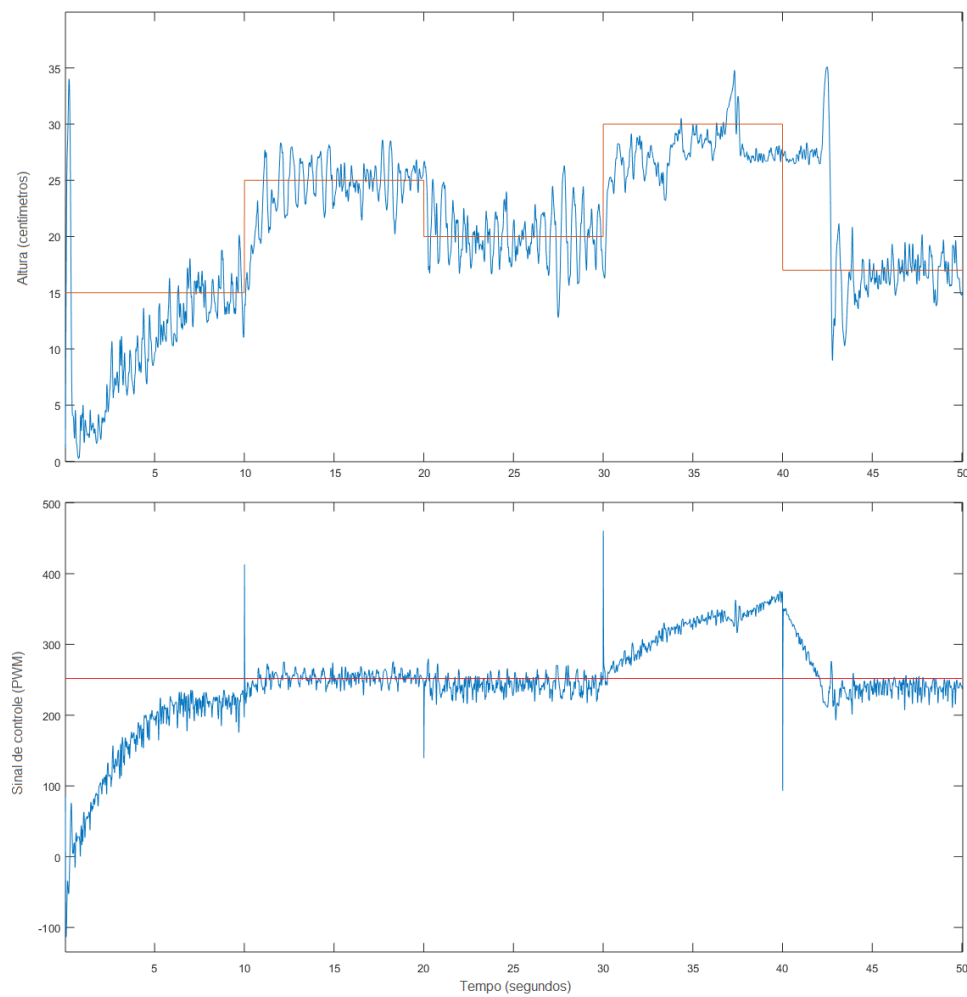
Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência de 30 cm.

Fonte: Autoria própria.

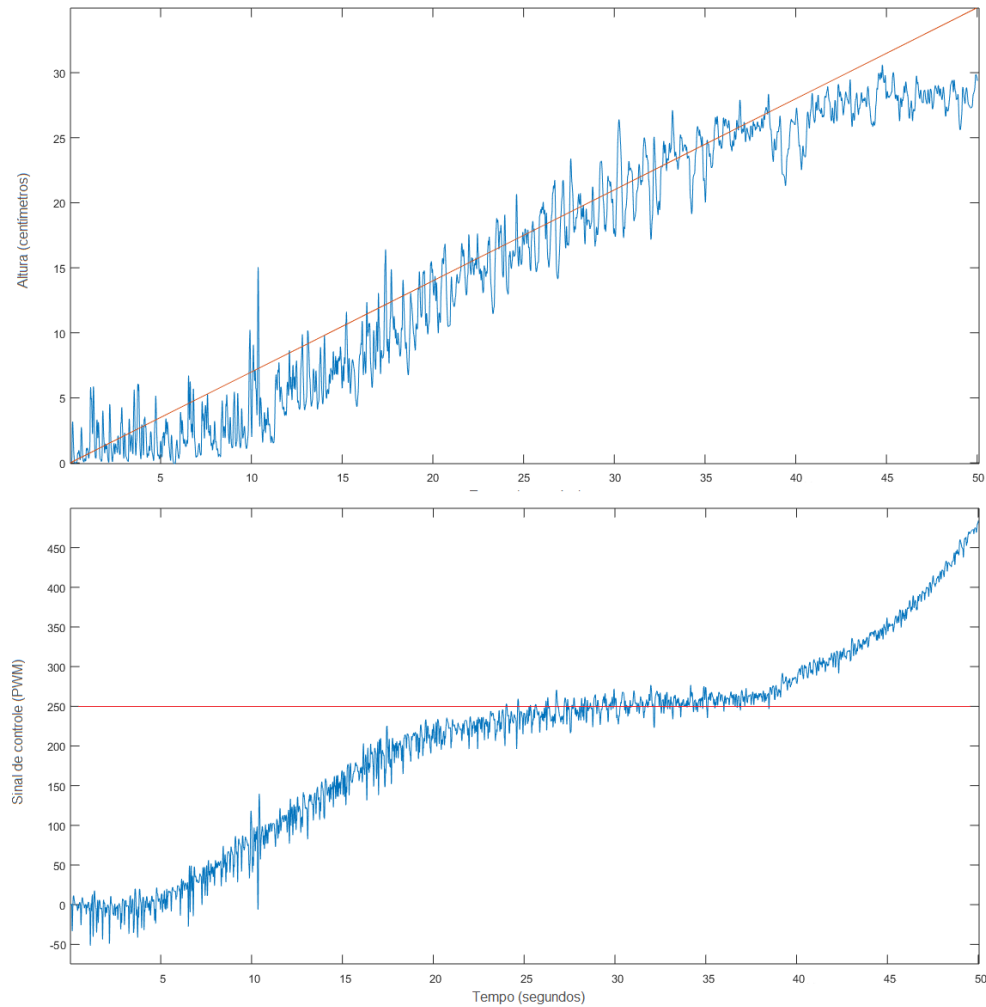
Na Figura 27 consta a saída controlada para a entrada do tipo degrau com variações de amplitudes, alternando a cada 10 segundos entre 15, 25, 20, 30 e 17 centímetros, e o sinal de controle correspondente.

Figura 27 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência do tipo degrau com variações nas amplitudes.



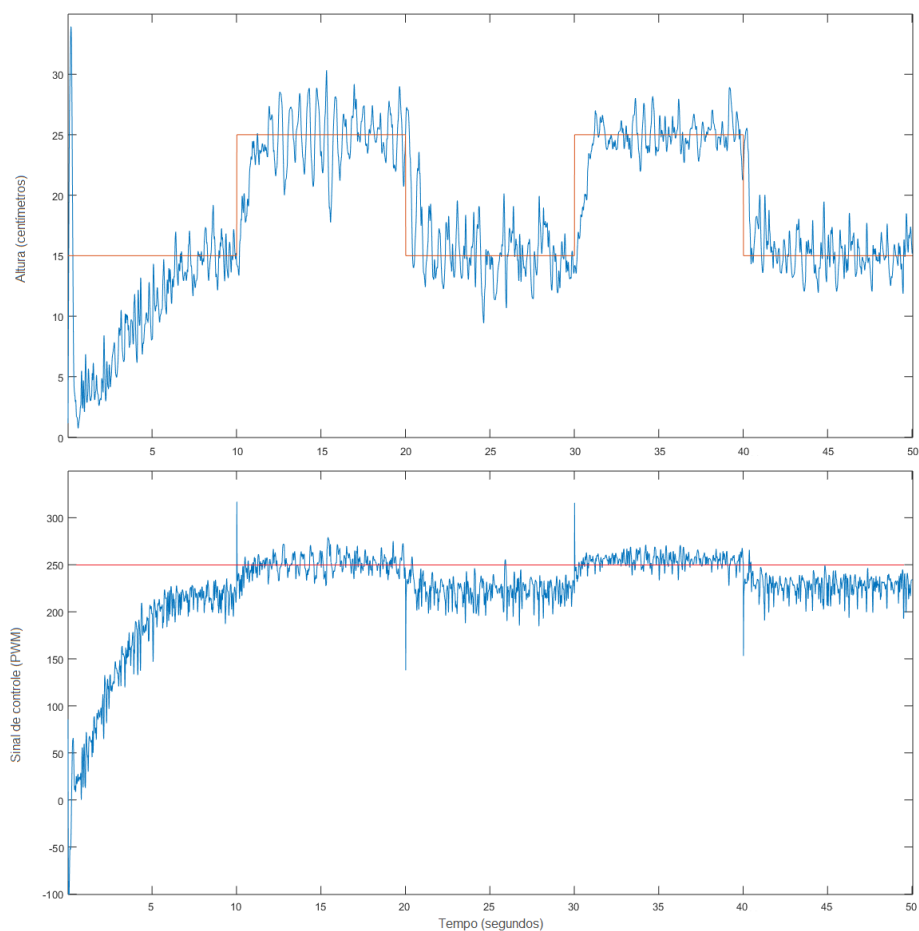
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 28, uma entrada em rampa é utilizada como referência, iniciando-se em 0 e terminando em 35 centímetros ao final da implementação, com razão de 0,70. O sinal de controle está presente na mesma figura.

Figura 28 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência do tipo rampa.

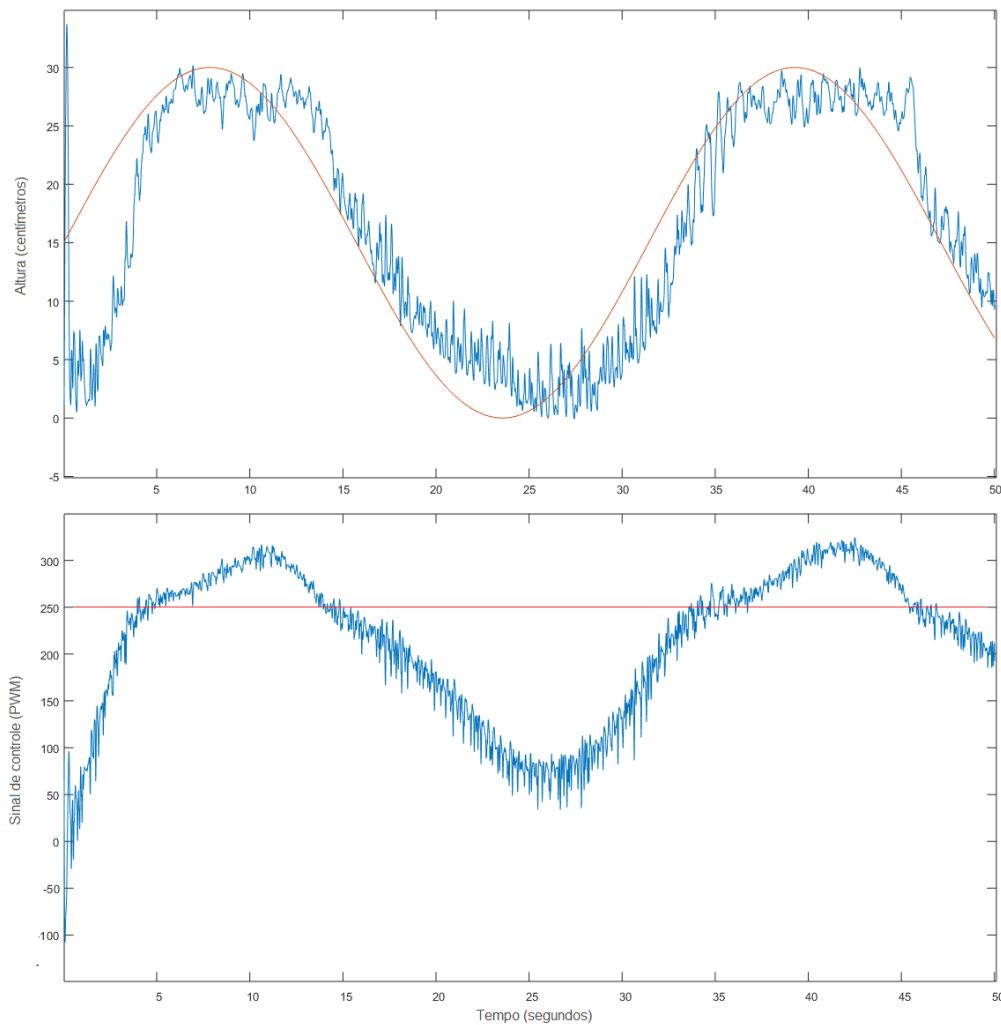
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 29, uma entrada do tipo onda quadrada é aplicada como referência, alternando regularmente a cada 10 segundos entre o nível baixo de 15 cm e o nível alto de 25 cm. Na mesma figura é apresentado o sinal de controle.

Figura 29 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência do tipo onda quadrada.

Fonte: Autoria própria.

Finalmente, foi inserida uma entrada do tipo senoidal de amplitude mínima 0 e máxima de 30 centímetros, conforme a resposta da Figura 30. Na mesma imagem é possível observar o sinal de controle.

Figura 30 – Posição vertical da bolinha para C_{PID} e referência do tipo senoidal.

Fonte: Autoria própria.

De modo geral, a análise das saídas controladas a partir do controlador C_{PID} é semelhante a apresentada utilizando o controlador C_{PI} e comentada no final da Seção 4.3. De qualquer forma, efetuando-se uma comparação entre as respostas transitórias dos controladores C_{PI} e C_{PID} pode-se complementar que nas curvas de natureza degrau ambos controladores geraram respostas oscilatórias, porém, o controlador C_{PID} forneceu uma resposta mais rápida, buscando a referência em menos tempo. Em relação as saídas em rampa, é possível visualizar uma menor oscilação quando utiliza-se do controle C_{PID} , fica bem claro após 35 segundos de implementação. Utilizando-se de uma referência em onda quadrada, o controlador C_{PID} também alcançou uma resposta mais rápida e suave, principalmente quando compara-se as respostas no nível mais alto da onda quadrada. Por último, e da mesma forma, percebe-se uma pequena vantagem do controlador C_{PID} sobre o C_{PI} no momento em que usa-se uma onda do tipo senoidal como referência, visualmente, a resposta do C_{PID} é mais rápida com menos oscilações.

5 Conclusões Finais

A partir dos diversos experimentos realizados e das respostas obtidas, pode-se inferir que o sistema de levitação a ar construído possui natureza de característica instável, muito oscilatória e, até mesmo, não-linear. Essas afirmações se baseiam no fato que a identificação de um modelo matemático de malha-aberta não pôde ser alcançada, visto que as alterações do sinal PWM não necessariamente correspondiam às variações proporcionais na leitura do sensor infravermelho. De qualquer forma, e considerando os objetivos específicos apresentados, foram concretizados o projeto e a construção de um protótipo funcional de levitação a ar, realizado a comunicação entre o módulo e o software MATLAB[®]/Simulink[®] via placa Arduino[®], bem como a síntese e a aplicação de controladores da família PID e análise das saídas controladas do sistema.

Como supracitado, não foi praticável a identificação de um modelo matemático fiel ao módulo por meio de nenhuma técnica testada, visto a necessidade do sistema operar em malha-fechada e com um ganho para gerar um sinal considerável na entrada do motor DC. Ainda assim, foram investigadas algumas técnicas de identificação de malha-fechada para sistemas instáveis, onde o objetivo seria extrair uma curva de reação para depois ser feita uma compensação algébrica. Esses métodos não se mostraram funcionais para o protótipo em questão, assim como a função “*ident*” do MATLAB[®] que, usualmente, trabalha com sistemas em malha-aberta.

Dada a não identificação de um modelo confiável, inviabilizou-se o estudo e a aplicação de uma técnica de controle mais avançada, pois sem um modelo matemático como base normalmente torna-se difícil projetar de forma sistemática um controlador adequado capaz de respeitar os requisitos de projeto. Assim, todos os controladores apresentados neste trabalho foram projetados de maneira empírica, por tentativa e erro, selecionando os ganhos que apresentaram a melhor resposta possível, dentro de um intervalo de valores predefinidos.

Apesar disso, foram obtidas diferentes respostas transitórias para diferentes controladores, com uma gama variada de sinais de entrada. As saídas usando somente um ganho proporcional ficaram limitadas apresentando erro de regime estacionário, ficando bem aquém da referência. O valor $k_p = 8$ foi escolhido pois um valor maior faz com que o sinal PWM, que atua no motor, aumente muito rapidamente, desestabilizando seu funcionamento e criando um fluxo de ar relativamente forte o suficiente para fixar a bolinha no topo do tubo. Um valor menor para k_p aumentaria o erro estacionário.

O controlador C_{PD} se mostrou ineficiente e muito oscilatório, alternando entre 0 e 255 (limites do sinal PWM), com estabilização rápida, porém com erro de regime. Nos ensaios, não foi possível encontrar nenhum outro valor de ganho que gerasse uma saída mais regular o suficiente para acrescentar nos resultados.

Diferentemente dos anteriores, de certo modo, o controlador C_{PI} atingiu as referências,

por mais que com uma certa lentidão. Optou-se por ganhos que não causassem *overshooting*, visto que o mesmo poderia desestabilizar o sistema. Nas entradas em degrau, a resposta levou em torno de 10 segundos para entrar em regime e sem erro. Nas outras entradas, o comportamento foi bem oscilatório (especialmente na entrada em rampa), mas sempre procurando buscar a referência.

Por fim, o controlador C_{PID} , com os ganhos projetados, apresentou uma saída mais suave, estabilizando em torno de 5 segundos e sem erro de regime nas referências em degrau. Desta forma, mostrou-se claramente mais consistente e respondendo rápido as variações, com um desempenho bastante positivo, com destaque à referência do tipo senoidal.

No geral, o comportamento do módulo se mostrou mais oscilatório, tendendo a instabilidade, conforme referências com maior amplitude (altura do tubo). Nas respostas, é perceptível que muitas vezes a saída ultrapassava facilmente o valor máximo e, ainda assim, a leitura se estabelecia abaixo da referência. Então, optou-se por não utilizar um saturador objetivando analisar os valores que o cálculo do erro atingia. Deduz-se que isso ocorria devido às aberturas laterais do tubo de PVC, pois a vazão de ar nas mesmas impedia o sistema de atingir a altura máxima de forma estável. Entretanto, o funcionamento do protótipo sem as ranhuras era completamente instável, e seis desenhos de entalho diferentes foram testados até se alcançar um que apresentasse uma melhor resposta.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo de métodos de identificação de sistema, aplicáveis a esse tipo de protótipo, para que se obtenha uma função de transferência de malha-aberta que possibilite o estudo e aplicação de diferentes estratégias de controle, atendendo, por exemplo, a requisitos de desempenho predefinidos, fazendo com que o módulo didático possa ser utilizado para diversas finalidades e propósitos relacionados a área de controle dinâmico.

Referências

- ALCÂNTARA, C. A. et al. Medição de distância dos obstáculos utilizando sensores de infravermelho e plataforma arduino. 2013. Citado na página 10.
- ALUR, R. et al. **Handbook of networked and embedded control systems**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. Citado na página 10.
- CHACON, J. et al. Design of a low-cost air levitation system for teaching control engineering. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 10, p. 2321, 2017. Citado na página 1.
- CHOŁODOWICZ, E.; ORLOWSKI, P. Low-cost air levitation laboratory stand using matlab/simulink and arduino. **Pomiary Automatyka Robotyka**, v. 21, p. 33–39, 12 2017. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 6.
- CHRISTOPHER, K. J. **Development, control and testing of an air levitation system for educational purpose**. Dissertação (Tesi di Laurea (Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione)) — POLITECNICO DI MILANO, Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria - DEIB, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 6.
- GOMES, F. J. et al. Módulo laboratorial de baixo custo, baseado em foss, para educação em engenharia de controle de processos industriais. In: **Anais: XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Cobenge. Blumenau, FURB**. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 1.
- MARCHESAN, M. Sistema de monitoramento residencial utilizando a plataforma arduino. **Santa Maria**, p. 17–19, 2012. Citado na página 9.
- NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. [S.l.]: LTC, 2012. v. 6. ISBN 978-0470-54756-4. Citado 3 vezes nas páginas 1, 3 e 14.
- OGATA, K. **Modern Control Engineering**. [S.l.]: Prentice Hall, 2011. (Instrumentation and controls series). ISBN 9780136156734. Citado 4 vezes nas páginas 1, 3, 4 e 14.
- PEREIRA, L. et al. Plataforma didática e experimental para investigações do circuito de chua. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática**. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 1.
- SILVA, O. F. et al. Mídias e tecnologias instrucionais para o ensino/aprendizado de sistemas de controle. Florianópolis, SC, 2001. Citado na página 1.
- UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. Citado na página 5.