



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS
CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**



JEAN CARLOS BARBOSA DE PAIVA

**UMA PLATAFORMA EDUCACIONAL DE BAIXO CUSTO BASEADA NO
SISTEMA BARRA E BOLA PARA O ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS
DINÂMICOS**

**MANAUS - AM
2020**

JEAN CARLOS BARBOSA DE PAIVA

**UMA PLATAFORMA EDUCACIONAL DE BAIXO CUSTO BASEADA NO
SISTEMA BARRA E BOLA PARA O ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS
DINÂMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
de Controle e Automação, do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia do
Amazonas, Campus Manaus Distrito Industrial
– IFAM/CMDI.

Orientador: Prof. Dr Vitor Bremgartner
da Frota

MANAUS – AM

2020

Espaço destinado a elaboração da ficha catalográfica sob responsabilidade exclusiva do Departamento de Biblioteca do IFAM.



Ministério da Educação
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas
Campus Manaus Distrito Industrial

Departamento de Engenharia de Controle e Automação
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



TERMO DE APROVAÇÃO

UMA PLATAFORMA EDUCACIONAL DE BAIXO CUSTO BASEADA NO SISTEMA BARRA E BOLA PARA O ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DINÂMICOS

por

JEAN CARLOS BARBOSA DE PAIVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 17 de Março de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação. O(a) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. DSc. Vitor Bremgartner da Frota
Professor Orientador

Prof. Esp. Ewerton Andrey Godinho RiBeiro
Professor Avaliador

Prof. MSc. Priscila Silva Fernandes
Professora Avaliadora

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus familiares, em especial ao meus pais, Juscelio e Maria que sempre acreditaram em meu potencial, por eles estou sempre em busca de me tornar melhor para poder oferecê-los o melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar a conclusão de mais uma etapa importante em minha vida, à minha família, em especial, à minha mãe Maria José, ao meu pai Jucélio Fernando, ao meu irmão Júlio César e à minha tia Lourdes Paiva, pelo constante apoio e suporte durante esta jornada. Não menos importante, agradeço aos demais familiares que vibram a cada conquista em minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr Vitor Bremgartner, pela motivação e disposição para guiar-me nesta trajetória acadêmica.

Aos meus amigos e colegas de turma pelas experiências vividas.

Agradeço ao corpo docente e a todos os servidores que compõem o quadro do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – Campus Manaus Distrito Industrial, pela convivência e aprendizagem durante esses dez períodos de grande satisfação.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho direta ou indiretamente.

“A altura das suas realizações será igual à profundidade das suas convicções.

(William F. Scolavino)”

RESUMO

Desde o final do último século a tecnologia evolui rapidamente, provocando mudanças na sociedade. Transformações na saúde, economia e na comunicação são exemplos destas mudanças e a área da educação é um dos setores que sofrem as mais positivas influências da utilização da tecnologia. Dessa forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma educacional de baixo custo baseada no sistema barra e bola para o ensino da disciplina de controle de sistemas dinâmicos a ser alocado no laboratório de controle do Instituto Federal do Amazonas (IFAM), onde os alunos poderão estudar o desempenho de sistemas dinâmicos e provar conceitos vistos em sala de aula, evitando a abstração provocada pela teoria da sala de aula. É notório que o ensino da engenharia baseada exclusivamente em discursos passa uma ideia muito incompleta e pouco instigante, que gera reprovações e desinteresse por parte dos alunos. Atualmente, não existe no Instituto Federal do Amazonas uma plataforma didática voltada para o ensino da disciplina de controle como a desenvolvida neste trabalho. Sendo assim, foi desenvolvida uma plataforma educacional a ser utilizada exclusivamente por professores e alunos do IFAM, suprimindo a falta de uma tecnologia que associe a teoria vista nas salas de aula e a prática operacional. A falta deste tipo de ferramenta, em um local de ensino da tecnologia, é uma falha que deve ser sanada de modo a proporcionar a melhoria do processo de ensino do campus e instigando pesquisas a serem realizadas na área que enalteçam o nome do IFAM. Por conseguinte, foi feita uma modelagem do sistema barra e bola, revisão bibliográfica do controlador PID com implementação através da plataforma Arduino, desenvolvimento de uma interface gráfica para controle da planta barra e bola através do software em Labview além da simulação e análise da planta em software Matlab visando apresentar de maneira gráfica o desempenho do sistema e os possíveis ganhos do controlador através do toolbox de controle e sistemas do Matlab.

Palavras-chave: Controlador PID. Plataforma Educacional. Sistema Barra e Bola.

ABSTRACT

Since the end of the last century, technology has evolved rapidly causing changes in society. Transformations in health, economics and communication are examples of these changes and the area of education is one of the fields that suffers the most positive influences from the use of technology. Thus, this work presents the development of a low-cost educational platform based on the bar and ball system for teaching the discipline of control of dynamic systems to be allocated in the control laboratory of the Federal Institute of Amazonas (IFAM), where students can study the performance of dynamic systems and prove concepts seen in the classroom, avoiding the abstraction caused by classroom theory. It is well known that the teaching of engineering based exclusively on speeches passes on a very incomplete and not very instigating idea, which generates disapproval and disinterest on the part of the students. Currently, there is no educational platform at the Federal Institute of Amazonas aimed at teaching the control discipline as developed in this work. Therefore, an educational platform was developed to be used exclusively by IFAM teachers and students, filling the lack of a technology that combines the theory seen in classrooms and operational practice. The lack of this type of tool, in a technology teaching site, is a flaw that must be remedied in order to improve the campus teaching process and instigate research to be carried out in the area that highlight the IFAM's name. Therefore, a modeling of the bar and ball system, bibliographic review of the PID controller with implementation through the Arduino platform, development of a graphical interface to control the bar and ball plant through the software in Labview, in addition to the simulation and analysis of the plant in Matlab software in order to graphically present the system performance and the possible gains of the controller through the Matlab control toolbox and systems.

Key words: PID controller. Educational Platform. Bar and Ball system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração do Sistema	17
Figura 2 - Sistema de Controle de Malha Aberta.....	18
Figura 3 - Sistema de Controle de Malha Fechada	18
Figura 4 – Funcionamento de Um Sensor Ultrassônico.....	21
Figura 5 - Componentes Internos de um Servomotor	22
Figura 6 - Arduino Uno.....	24
Figura 7 - Paleta de Controle	25
Figura 8 - Paleta de Funções	26
Figura 9 -Diagrama de corpo livre do sistema	28
Figura 10- Resposta da Planta em Malha Aberta.....	30
Figura 11-Resposta da Planta em Malha Fechada	30
Figura 12 - LGR da Planta Barra e Bola	31
Figura 13 - Diagrama de Bode da Planta	32
Figura 14 - Magnitude na Frequência Zero e Magnitude na Frequência de Corte	33
Figura 15 - Resposta ao Degrau Unitário do Sistema Contínuo e Discreto em Malha Aberta	34
Figura 16 - LGR da Planta Discreta.....	34
Figura 17 - Toolbox Para Controle de Sistemas do Matlab	35
Figura 18 - LGR da Planta Compensada.....	36
Figura 19 - Resposta ao Degrau da Planta Compensada	36
Figura 20 - Parâmetros e Performance do Controlador	37
Figura 21 - Modelo da Impressora 3DCloner DH+	37
Figura 22 - Desenho em 3D da Planta Barra a e Bola	38
Figura 23 - Tela Inicial do Software CLonerGen3D	38
Figura 24 - Tela de Configuração do CódigoG do Software ClonerGen3D.....	39

Figura 25 - Tela de Impressão do Software ClonerMake3D	39
Figura 26 - Ambiente VI Package Manager	41
Figura 27 - Busca Pelo Toolbox de Comunicação Com Plataformas Microcontroladas	41
Figura 28 - Estrutura PID Escolhida Para o Projeto	42
Figura 29 - Seleção do Sensor de Distância no Toolbox MakerHub	42
Figura 30 - Seleção do Atuador Servomotor no Toolbox Makerhub	43
Figura 31 - Interface da Plataforma Educacional.....	43
Figura 32 - Montagem Final da Parte Estrutural.....	44
Figura 33 - Seleção Do Tipo De Plataforma Arduíno Na Interface do Makerhub	45
Figura 34- Seleção Da Porta Serial Em Que Se Encontra a Plataforma	45
Figura 35 - Opção Da Ferramenta Labview Para Criação De Aplicações.....	46
Figura 36 - Plataforma Educacional Comercial	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do Sensor Ultrassônico HC-Sr04	21
Tabela 2 - Especificações Servo Motor Tower Pro MG995	23
Tabela 3 - Orçamento do Projeto	47
Tabela 4 - Especificações da Plataforma Educacional Comercializada pela ACC Motion Solutions	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

VANT– Veículo Aéreo Não Tripulado;

IFAM – Instituto Federal Do Amazonas;

CMDI – Campus Manaus Distrito Industrial;

PID – Proporcional, Integral, Derivativo;

IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado

LABVIEW – Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench

VI – Instrumento Virtual

NI – National Instruments

VISA - Virtual Instrument Software

ASL – Academic Site License

ZOH – Zero Order Holder

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1. OBJETIVOS	15
1.1. Objetivo Geral.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
1.3 JUSTIFICATIVA.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 a planta barra e bola	17
2.2 Sistemas de controle.....	17
2.3 controlador pid	19
2.3.1 TERMO PROPORCIONAL	19
2.3.2 TERMO INTEGRAL.....	19
2.3.3 TERMO DERIVATIVO	20
2.4 SENSOR ULTRASSÔNICO HC – SR04	20
2.5 Servo motor.....	22
2.7 Labview	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS	27
3.1 Modelagem da planta barra e bola	27
3.1.1 Função de Transferência	28
3.2 PROJETO DE CONTROLADOR	31
3.4 DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE NO AMBIENTE DO LABVIEW....	40
3.4.1 PREPARAÇÃO DO AMBIENTE LABVIEW	40
3.4.2 ESTRUTURAS DE COMANDO EM LOOP	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5. CONCLUSÃO	49
5.1 Trabalhos futuros	50
6 REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

A engenharia evolui rapidamente, pois o homem busca incessantemente formas de facilitar os trabalhos do dia a dia. Com o advento da automação, técnicas e equipamentos tornaram os sistemas mais produtivos que, conseqüentemente, aumentam a qualidade de vida. É manifesto da educação em âmbito geral passar por um período de reformulação (Froyd et al., 2012), à medida em que as tecnologias vão avançando e alcançando patamares nunca obtidos.

As plataformas educacionais estão presentes em diversos ramos da ciência e da engenharia, entretanto, sua aquisição é relativamente difícil dados os elevados custos e para driblar este empecilho, os próprios departamentos das universidades desenvolvem as suas plataformas de ensino. As soluções comerciais podem superar as possibilidades econômicas dos departamentos, mas a força de vontade, criatividade e determinação dos estudantes e pesquisadores superam qualquer dificuldade. O Radiômetro de Crookes foi utilizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como plataforma de ensino de controle digital, dada a alta demanda pelos cursos de Engenharia, mais especificamente na disciplina de controle e servomecanismos (GOMES et al., 2014) Um Kit didático utilizando dois tanques, sensores de vazão, temperatura e nível foi desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia, no departamento de Engenharia Elétrica, para disciplina de controle digital de processos para suprir a demanda pela associação entre teoria e prática das teorias de controle (ALBERNAZ et al., 2012).

Controle está ligado à utilização de recursos para que um sistema funcione, sem auxílio humano, de maneira desejada. Um sistema de controle é uma interconexão de componentes que formam uma configuração de sistema que rodutirá uma resposta desejada (DORF e BISHOP, 2001). Sabe-se da importância e necessidade da utilização de plantas industriais no ensino de controle automático e sistemas dinâmicos, para que os alunos tenham contato com situações próximas ao que enfrentarão na vida profissional (RAMOS, et al., 2016). Neste aspecto, o estudo da teoria associada à prática de controle automático ganha cada vez mais espaço tendo em vista que a tarefa de modelar e controlar sistemas não é trivial.

Através do ensino de toda a teoria, é possível iniciar um trabalho prático para obter o maior desempenho dos estudantes fazendo com que estes apliquem na prática os conhecimentos adquiridos em sala, garantindo a fixação e validação do aprendizado por meio de plataformas reais de aprendizado. As soluções comerciais apresentam um elevado grau de acabamento e uma boa performance em software, pois foram desenvolvidos por um grupo de desenvolvimento e com bastante tempo investido, entretanto o objetivo do ensino prático pode ser alcançado com equipamentos desenvolvidos pelos próprios departamentos das universidades e ajustados com o decorrer da utilização, associado ao baixo custo de implementação que, como dito anteriormente, é um dos empecilhos para a aquisição de plantas didáticas por parte das instituições.

A teoria de controle automático é uma tarefa desafiadora não somente para os estudantes, mas também por aqueles que pretendem ensinar nos cursos de graduação (COLON and DINIZ, 2009). Uma ferramenta prática associada à sala de aula facilitará não só o entendimento por parte dos alunos, mas também facilitará o repasse do conhecimento e a explicação das diversas

teorias que compõem a teoria do comportamento de sistemas dinâmicos e disciplinas associadas por parte dos educadores.

A partir destes conceitos, o presente trabalho considera o desenvolvimento uma plataforma educacional de hardware e software, baseada no sistema barra e bola para o estudo de desempenho de sistemas dinâmicos. Onde os estudantes poderão projetar diversos tipos de controladores com base no controlador proporcional-integral-derivativo (controlador PID) em uma interface de fácil utilização desenvolvida no software do Labview, bastando apenas algumas poucas predefinições para que o usuário possa desfrutar de todas as possibilidades da ferramenta.

Sendo assim, a possibilidade de aumentar a qualidade técnica e prática dos estudantes do Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Campus Manaus Distrito se torna um questionamento válido para levantamento de referências na literatura e desenvolvimento de uma plataforma didática de ensino que se diferencie dos simuladores como; Simulink que é uma ferramenta de modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos; Proteus que é um programa para simulação e módulos de projetos de placas de circuito impresso.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma plataforma didática baseada na planta barra e bola para o ensino de controle de sistemas dinâmicos.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Facilitar o ensino de controle de sistemas dinâmicos
- Permitir que estruturas de baixo custo sejam utilizadas para o ensino de controle
- Apresentar um método de construção de kit didático para ensino de controle

1.3 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho se justifica pelo alto grau de abstração no ensino da disciplina de controle de sistemas dinâmicos com os simuladores que afastam e dificultam o entendimento da real utilidade do tópico de seu estudo, ficando a teoria desconectada da prática, findando num aprendizado incompleto.

Outra motivação para o desenvolvimento desta plataforma possui relação com o custo da mesma. As plataformas educacionais existentes no mercado são, em geral, muito caras em relação à plataforma proposta por este trabalho.

A proposta de uma plataforma didática que visa o aprimoramento do ensino faz a conexão entre teoria e prática, instigando e estimulando o aluno iniciante a se aprofundar na disciplina ao passo em que melhor compreende os tópicos de estudo.

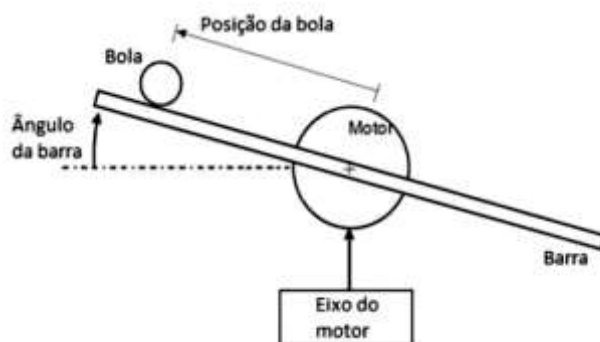
Deste modo, a contribuição deste trabalho está em facilitar o entendimento da disciplina por parte dos estudantes de controle através da plataforma prática de aprendizado que utiliza ferramentas próximas da realidade dos estudantes, além da possibilidade ser uma interessante ferramenta para o sistema de ensino da instituição que, conseqüentemente, formará profissionais melhores capacitados para o mercado de trabalho, dado que o produto final da instituição é o aluno formado com conhecimento consolidado, além da formação de um profissional mais preparado para os problemas reais que este encontrará em sua futura vida profissional.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A PLANTA BARRA E BOLA

A planta barra e bola, juntamente com a planta do pêndulo invertido, são modelos bastante populares para o ensino de engenharia de sistemas de controle (Keshmiri et al., 2012). Dada as suas características, este sistema é uma importante ferramenta educacional para as disciplinas que envolvem sistemas dinâmicos. Este modelo apresenta características que o tornam efetivo no ensino dos princípios de realimentação e controle (CHOI et al., 2008). Deste modo, a planta relaciona-se com a dinâmica de estabilização horizontal de um avião durante o pouso e/ou no fluxo turbulento do ar, permitindo a aplicação de importantes métodos de controle clássico e moderno (Scalabrin et al., 2014; Yu, 2009; Li and Yu, 2010). A Figura 1 exibe o funcionamento desta planta clássica.

Figura 1 - Configuração do Sistema



Fonte – Adaptado de Wellstead (2000)

A tarefa que este sistema deve executar é controlar automaticamente a posição da bola ao longo da barra alterando o ângulo da barra, não sendo esta atividade de fácil execução, pois a bola não permanece em um único local na barra, mas move-se com uma aceleração proporcional ao ângulo da haste. Este sistema em malha aberta é considerado instável porque o sinal de saída – a posição da bola – aumenta ilimitadamente para uma entrada fixa, que é o ângulo da barra (WELLSTEAD, 2000).

Os sistemas instáveis estão presentes em muitos processos industriais e tecnológicos modernos, dentre os quais se podem citar as indústrias de processos químicos através do processo de controle de reações exotérmicas, na geração de energia e no controle horizontal de um foguete ou aeronave (WELLSTEAD, 2000).

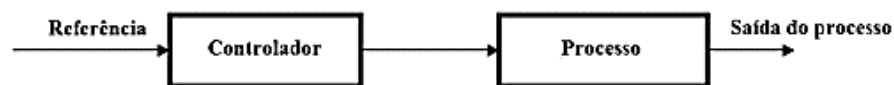
2.2 SISTEMAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle são sinônimo de avanço nos ramos da engenharia e ciência. Os sensores de ré nos automóveis, sistemas de interrupção dos fornos micro-ondas, caixas eletrônicos e entre outros, constituem sistemas simples de controle. Há também sistemas mais

complexos como o caso das máquinas-ferramentas, sistemas de piloto automático dos veículos, sistemas robóticos e em muitos processos industriais e de manufatura (OGATA, 2010).

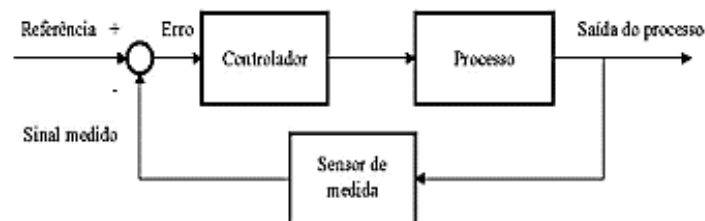
Há dois tipos básicos de sistemas de controle: Os sistemas em malha aberta e os Sistemas em malha fechada. Em um sistema de controle de malha aberta temos um dispositivo atuador ou controlador que modifica diretamente o estado de um sistema. Neste tipo de sistema o sinal de saída não é medido e, conseqüentemente, o seu valor não é comparado com o sinal de entrada (OGATA, 2010). Os sistemas de Controle podem ser representados em diagramas de bloco, como visto na Figura 2 que representa um sistema em malha aberta.

Figura 2 - Sistema de Controle de Malha Aberta



Os sistemas de controle em malha fechada são aqueles no qual o sinal de saída possui efeito direto na ação de controle futura. Este sistema utiliza uma relação entre o sinal de referência e o sinal de saída (retroalimentação), gerando uma terceira variável chamada de 'erro' para controlar o processo, de tal forma que seja possível reduzir este erro a zero, ou o tanto que se deseja. O sinal de erro é a entrada do controlador, de modo que seja possível reduzir este erro e levando a variável controlada ao valor que foi definido pela referência. Em outras palavras, o termo “malha fechada” implica o uso de ação de realimentação com a finalidade de reduzir o erro do sistema. O diagrama de blocos do sistema em malha fechada pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Sistema de Controle de Malha Fechada



Os sistemas em malha fechada possuem custo mais elevado dado sua maior complexidade de implementação com relação ao controle de malha aberta. Os sistemas em malha fechada tendem a rejeitar os distúrbios externos e internos do sistema, possuindo menor sensibilidade às variações do processo, reduzindo o erro em regime permanente. Como este sistema tende a ser mais complexo, um dos problemas nos quais estes sistemas estão expostos é com relação a sua estabilidade. Este tipo de controle tende a corrigir erros além dos necessários, ocasionando eventuais oscilações crescentes ou constantes (OGATA, 2010).

2.3 CONTROLADOR PID

O controlador PID, ou controlador de três termos, é utilizado para controlar uma variedade de variáveis de processo, tais como; temperatura, fluxo, posição e pressão. As aplicações deste controlador variam desde a escala de processos industriais, bem como no setor científico e de laboratório, onde precisão e confiabilidade são essenciais para a qualidade de uma aplicação de controle. A popularidade dos controladores PID pode ser atribuída parcialmente ao seu bom desempenho em uma ampla faixa de condições de operações e parcialmente à sua simplicidade funcional que permite aos engenheiros operá-los de um modo simples e direto (DORF e BISHOP, 2011).

$$G_c(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \quad (1)$$

2.3.1 TERMO PROPORCIONAL

A componente proporcional do controlador depende da diferença entre o ponto de ajuste, ou setpoint, e a variável de processo. Esta diferença é chamada de erro do sistema $e(t)$. O ganho proporcional (K_p) determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro. Por exemplo, se o termo de erro tem uma magnitude de 10, um ganho proporcional de 5 produziria uma resposta proporcional de 50. Em geral, aumentando o ganho proporcional irá aumentar a velocidade da resposta do sistema de controle.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2)$$

Onde:

- $u(t)$: Saída do controlador;
- K_p : Ganho Proporcional;
- $e(t)$: Erro.

Independentemente do mecanismo real, ou da forma da potência de operação, o controlador é essencialmente um amplificador com um ganho ajustável (OGATA, 2010).

2.3.2 TERMO INTEGRAL

A componente integral do controlador soma o termo de erro ao longo do tempo. O resultado é que mesmo um pequeno erro fará com que a componente integral aumente lentamente. A resposta integral irá aumentando ao longo do tempo a menos que o erro seja zero, portanto, o efeito é o de conduzir o erro de estado estacionário para zero. O Steady-State de erro é a diferença final entre as variáveis do processo e do setpoint.

O termo integral por si só não é uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional.

$$u(t) = K_i \int e(t) dt \quad (3)$$

Onde:

- $u(t)$: Saída do controlador;
- K_i : Ganho Integral;
- $e(t)$: Erro;

2.3.3 TERMO DERIVATIVO

A componente derivativa faz com que a saída diminua se a variável de processo está aumentando rapidamente. A derivada da resposta é proporcional à taxa de variação da variável de processo. Aumentar o parâmetro do tempo derivativo (K_d) fará com que o sistema de controle reaja mais fortemente as mudanças no parâmetro de erro aumentando a velocidade da resposta global de controle do sistema. Na prática, a maioria dos sistemas de controle utilizam o tempo derivativo (K_d) muito pequeno, pois a derivada de resposta é muito sensível ao ruído no sinal da variável de processo. Se o sinal de realimentação do sensor é ruidoso ou se a taxa de malha de controle é muito lenta, a derivada de resposta pode tornar o sistema de controle instável. Assim como o termo integral, o termo derivativo por si só não é uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional.

$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Onde:

- $u(t)$: Saída do controlador;
- K_D : Ganho Derivativo;
- $e(t)$: Erro;

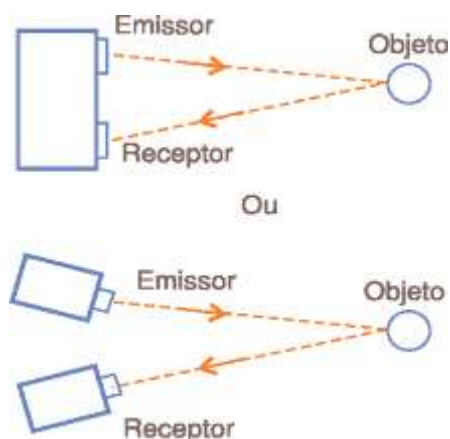
2.4 SENSOR ULTRASSÔNICO HC – SR04

Um sensor ultrassônico é um dispositivo que utiliza alta frequência de som para medir a distância entre itens determinados. Estas ondas possuem frequência de oscilação maior do que as audíveis pelos seres humanos, operando na frequência acima de 20KHz. Estes sensores são também conhecidos como transceptores, e são capazes de operar semelhante ao sonar. Enquanto o sonar é principalmente utilizado debaixo da água, os transceptores de ultrassom podem ser utilizados no ambiente terrestre, tendo o ar como meio de transmissão. Os sensores de ondas ultrassônicas são comuns em aplicações industriais e médicas, além de outras aplicações.

Seu princípio de funcionamento está baseado na lei da ótica física em que o ângulo de incidência da onda é igual ao seu ângulo de reflexão. O cálculo da distância percorrida pela onda é baseado na velocidade de propagação da onda no ar, onde a mesma alcança uma velocidade de 340 m/s, e na medição do tempo levado para a recepção do eco produzido quando esta onda se choca com um objeto que seja capaz de refletir o som. Eles emitem pulsos

ultrassônicos ciclicamente. Na verdade, quando um objeto reflete estes pulsos, o resultado será um eco recebido e convertido em um sinal elétrico. Há diversos transdutores ultrassônicos e sua construção mais básica se dá por transmissor, receptor e circuito de controle. A Figura 4 mostra o funcionamento básico de um sensor ultrassônico.

Figura 4 – Funcionamento de Um Sensor Ultrassônico



Fonte – Adaptado de Repositório da Automação (2020c)

Um sensor de ultrassom nem sempre é preciso, no entanto, vários fatores podem degradar a capacidade de um sensor para medir a distância com precisão. Os objetos metálicos ou macios refletem as ondas sonoras de diferentes maneiras, fatores do ambiente como temperatura e umidade do ar. A Tabela 1 demonstra as especificações do sensor em questão.

Tabela 1 - Especificações do Sensor Ultrassônico HC-Sr04

Tensão de Alimentação	5V DC
Corrente Consumida	15 mA
Frequência de Operação	40 kHz
Distância Máxima	4m
Distância Mínima	2cm
Ângulo de Medição	15 Graus
Sinal de Entrada [Trigger]	Pulso TTL (5V) de 10 us
Sinal de Saída [Echo]	Pulso TTL (5V) Proporcional à distância detectada
Dimensões	40mm x 20mm x 15mm

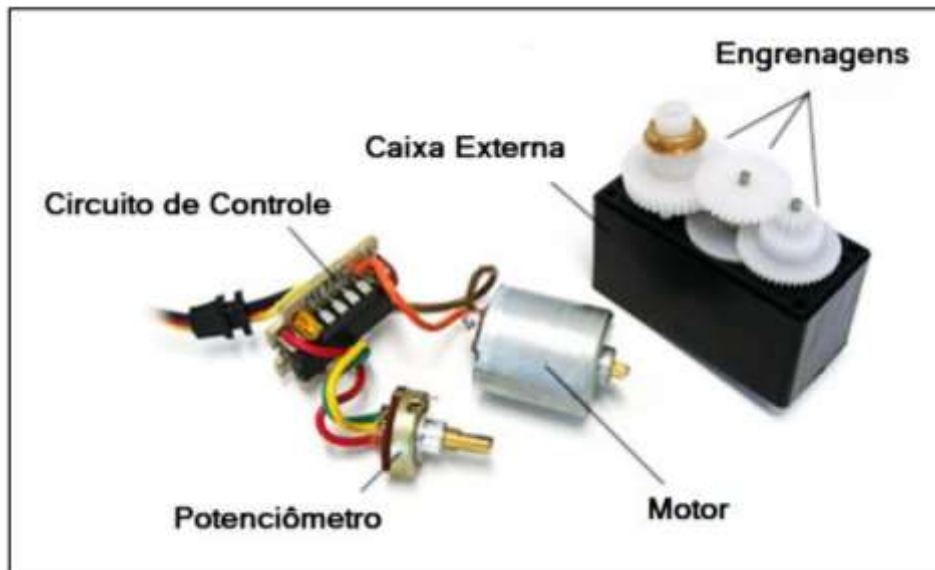
Fonte – Adaptado de Repositório da Automação (2020)

2.5 SERVO MOTOR

Um servomotor é um dispositivo de malha fechada. Recebe um sinal de controle, verifica a posição do eixo através de um elemento sensor e por fim atua no sistema mandando o eixo para a posição desejada. Servomotores são utilizados quando se necessitam de controle de velocidade, alta precisão no posicionamento, quando espaços são reduzidos e etc. Os servomotores são extremamente robustos e possuem uma alta capacidade de manter uma posição mesmo quando sofre uma força em direção contrária ao movimento do seu eixo. Os servomotores são bastante utilizados nas áreas de modelismo devido a sua precisão no posicionamento e ao alto torque que este dispositivo possui com relação ao seu pequeno tamanho.

Este atuador é composto, normalmente, por um motor elétrico, geralmente motores de corrente contínua, embora também possamos encontrá-lo de corrente alternada. Apresenta um conjunto de engrenagens que forma uma caixa de redução com uma relação bem longa o que ajuda a amplificar o torque. O sensor normalmente é um potenciômetro acoplado ao eixo do servo, pois com o valor de sua resistência elétrica determina-se a posição angular do eixo. Por fim, tem-se o circuito de controle que é formado por componentes eletrônicos discretos ou circuitos integrados e geralmente é composto por um oscilador e um controlador que recebe o sinal do sensor e o sinal de controle aciona o motor no sentido necessário para posicionar o eixo na posição desejada.

Figura 5 - Componentes Internos de um Servomotor



Fonte – Adaptado de Mantovani (2013)

O servomotor da Figura 5 deve ser alimentado com tensão de 5 V e o controle da posição angular do mesmo ocorre com sinais PWM. Este sinal é monitorado em períodos de 20 ms (frequência de 50 Hz) e os pulsos possuem largura de 1 até 2 ms. Quando a largura do pulso é de 1 ms, o servo está na posição 0°, já na posição de 90° a largura do pulso é igual a 1,5 ms e enquanto a largura durar 2 ms a posição do servo é correspondente a 180°. Desta forma,

conforme há variação na largura do pulso, a posição do motor será alterada, variando de 0 até 180° (EPUSP, 2014). A Tabela 2 exibe as especificações do servo motor em questão.

Tabela 2 - Especificações Servo Motor Tower Pro MG995

Tensão de Operação	4,8 ~7,2V
Engrenagem	Metálica
Modulação	Analógica
Velocidade de Operação	0,17 seg/60 graus (4,8V s/ Carga)
Velocidade de Operação	0,13 seg/60 graus (6,0V s/ Carga)
Torque	9,4 kg.cm (4,8V) e 11 kg.cm (6,0V)
Faixa de Rotação	120°
Tamanho do Cabo	300 mm
Dimensões	40mm x 19mm x 43mm
Peso	69g

Fonte – Adaptado de Felipeflop (2020)

2.6 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar. As placas Arduino são capazes de ler entradas - luz em um sensor, um dedo em um botão ou até mesmo uma mensagem no Twitter - e transformá-lo em uma saída - ativando um motor, ligando um LED, publicando algo online. Você pode dizer à sua placa o que fazer enviando um conjunto de instruções ao microcontrolador na placa. Para fazer isso, você usa a linguagem de programação Arduino (com base em wiring) e o Software Arduino (IDE), com base no Processing.

A ideia do Arduino foi concebida em 2005, no IDI (Interaction Design Institute), situado na cidade de Ivrea, na Itália. O grande mentor deste projeto foi o professor Massimo Banzi juntamente com David Cuartielles. Os dois buscavam uma forma de baratear e facilitar o ensino de tecnologia aos estudantes de design, pois os materiais que existiam eram difíceis de usar e também eram caros. As duas principais metas estipuladas por Banzi e Cuartielles eram que esta nova plataforma fosse barata e que qualquer pessoa pudesse utilizá-la. Em virtude da implementação destas características no Arduino, a popularidade desta placa cresceu rapidamente. (EVANS, NOBLE, HOCHENBAUM, 2013).

O Arduino possui alguns componentes discretos, nos quais podemos citar o microcontrolador Atme AVR, um oscilador para gerar os pulsos de clock, um regulador linear

de tensão de 5 volts e uma saída USB, que possibilita comunicação serial com computadores externos e fazer o upload/download de dados salvos na placa. Vale ressaltar que Arduino é o nome da plataforma que contém os microcontroladores da família Atmel. Muitas pessoas confundem Arduino ao microcontrolador, que nada mais é do que o cérebro por trás da placa.

Figura 6 - Arduino Uno



Fonte – Adaptado de Arduino(2020a)

A Plataforma arduino contém entradas digitais e analógicas, que podem ser configuradas de acordo com a necessidade do usuário. Botão de reset forçado, caso o usuário necessite reiniciar o sistema e diversos protocolos de comunicação.

A programação da plataforma é realizada através de sua IDE, que nada mais é do que um software onde toda a programação é desenvolvida pelo usuário e a linguagem de programação é uma adaptação da linguagem C pura. As Sketches são os programas/instruções desenvolvidos para o rodar na plataforma Arduino. O Upload do programa é feito através de sua própria IDE para a memória flash do microcontrolador, permitindo a conexão dos demais periféricos à placa para realização da tarefa pré-determinada pelo usuário.

2.7 LABVIEW

O Labview é um software criado para o desenvolvimento de testes, medições e controle de sistemas. Usando o ambiente integrado do LabView para interfacear com sinais reais, analisar dados extraindo informações importantes e compartilhar resultados, é possível aumentar a produtividade e eficiência de qualquer processo (COSTA, 2020a). Com o Labview há um melhor controle do sistema em que se deseja trabalhar, possibilitando medições e um melhor entendimento do processo. O Labview utiliza programação em linguagem G (Programação gráfica), a qual possibilita ao usuário implementação de várias estruturas, oferece mais de 3000 funções e ferramentas. A linguagem de programação torna a programação, montagem e entendimento do funcionamento dos sistemas mais fácil.

Os programas desenvolvidos no LabView são chamados de VI'S (Virtual Instruments), dado que os ícones se assemelham aos instrumentos físicos. Cada VI é dividido em duas partes: Diagrama de Blocos e Painel Frontal. No Painel Frontal temos a interação do usuário com o sistema, pode ser visto a leitura de sensores, acionar atuadores, ver gráficos e entre outros. Seu

submenu é a paleta de controles, onde há diversos controles, botões e estão divididos em categorias para facilitar a busca do usuário. A Figura 7 mostra a paleta de controles.

Figura 7 - Paleta de Controle



Fonte - Autor

O diagrama de blocos é o local onde o usuário realiza a programação em linguagem G do sistema. Os objetos que aparecem no diagrama de blocos são os nós, que podem representar funções, estruturas de execução ou subVI's. Os nós possuem entradas e/ou saídas para realizar as interligações entre os demais e realizar as ações desejadas. Cada item da paleta de controle tem seu nó no diagrama de blocos, logo, para montar seu projeto, basta saber quais componentes são necessários, posicioná-los da forma correta e executar as ligações de acordo com as exigências de cada nó. Seu submenu é a paleta de funções onde é possível encontrar funções, constantes, outros VI's e também está dividida em categorias para facilitar a busca por parte do usuário. A Figura 8 exibe a paleta de funções.

É possível programar utilizando as mesmas estruturas de execução como laços *for*, *if*, *while*, *do while* e entre outros. Cabendo ao usuário montar seu projeto da forma como bem deseja, para que as estruturas de repetição funcionem de acordo com alguma condição pré-definida.

Figura 8 - Paleta de Funções



Fonte - Autor

Softwares como o LabVIEW estão sendo utilizados dentro da indústria para otimizar os processos de captação e processamento de dados, num mercado que demanda cada dia mais rapidez e agilidade. Portanto, até mesmo durante a graduação, é importante conhecer as ferramentas que estão auxiliando as empresas, para se tornar um profissional bem informado e capacitado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Este trabalho tem o propósito de desenvolver uma plataforma de ensino para o estudo de sistemas dinâmicos, onde o usuário poderá utilizar de software de controle para definir o setpoint; alterar os parâmetros do controlador como os ganhos proporcional, integral e derivativo; definir o tempo integral, tempo derivativo, faixa de saída e faixa de setpoint. Desta forma, podemos destacar que o projeto é dividido nas seguintes fases:

1. Modelagem e simulação da planta em software matlab;
2. Desenvolvimento da parte mecânica da planta barra e bola;
3. Desenvolvimento e programação da interface em software Labview;
4. Integração e testes de Software e hardware.

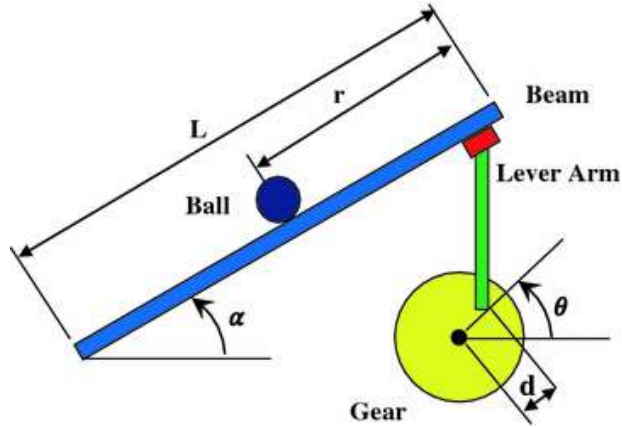
3.1 MODELAGEM DA PLANTA BARRA E BOLA

A posição da bola é medida através de um sensor que se comunica com o controlador através de um sinal de realimentação, onde sua função é informar a posição real da bola para que o sistema faça o controle de sua posição através do atuador de forma automática nesta malha fechada de controle. Não é uma tarefa trivial, dado que a bola está livremente a percorrer toda a extensão da barra, movimentando-se de acordo com a angulação da haste.

É sabido que este sistema possui malha aberta instável e não linear. A linearidade depende diretamente do desvio angular da barra, pois quando a barra desvia um pequeno ângulo, a partir da posição horizontal, a propriedade não linear é menos significativa (Wang, 2007), sendo possível a linearização do sistema. No entanto, quando as não linearidades tornam-se significativas, ou seja, o ângulo da barra em relação horizontal é maior do que 30 graus, uma aproximação linear simples não é precisa.

Para encontrarmos o modelo matemático da planta, devemos considerar a Figura 9 que descreve o diagrama de corpo livre do sistema através da relação de equilíbrio de um corpo esférico de momento de inércia J sobre uma barra com movimento linear de rolamento sobre a barra, ou seja, o sistema possui um grau de liberdade. À medida em que o servo faz o movimento com ângulo Θ , o ângulo α também é alterado por consequência do movimento de alavanca.

Figura 9 -Diagrama de corpo livre do sistema



Fonte – Adaptado de Hui and Sharma (2015)

Para darmos seguimento com a modelagem, assumiremos que a bola rola sem escorregar e o atrito entre a viga e a bola é desprezível. Os critérios de projeto são: Tempo de acomodação de 3 segundos e Overshoot de 5%. A equação do equilíbrio do sistema mostrado na figura acima é dada por:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \cdot \ddot{r} + m \cdot g \cdot \sin \alpha - m \cdot r \cdot \alpha^2 = 0 \quad (5)$$

Quando em equilíbrio, o ângulo α é zero e, portanto, podemos utilizar a relação $\sin \alpha = \alpha$, que é válida para ângulos menos que 15° . Sendo assim, a aproximação linear do sistema passa a ser:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \cdot \ddot{r} = -m \cdot g \cdot \alpha \quad (6)$$

A equação que relaciona o ângulo α da barra com o ângulo θ de variação servomotor pode ser aproximada como linear pela equação:

$$\alpha = \frac{d}{L} \theta \quad (7)$$

Substituindo (9) em (8) temos:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \cdot \ddot{r} = -m \cdot g \cdot \frac{d}{L} \theta \quad (8)$$

3.1.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Tomando a transformada de Laplace da equação (10) e tomando as condições iniciais de posição e velocidade nulas, a seguinte equação é encontrada:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \cdot R(s) s^2 = -m \cdot g \cdot \frac{d}{L} \theta(s) \quad (9)$$

Reorganizando a equação (11), encontramos a função de transferência do ângulo de rotação do eixo do servomotor $\Theta(s)$ em função da posição da bola $R(s)$ em tempo contínuo.

$$G(s) = \frac{R(s)}{\theta(s)} = -\frac{mgd}{L\left(\frac{J}{R^2} + m\right)} \cdot \frac{1}{s^2} \quad [\text{m/rad}] \quad (10)$$

Os parâmetros do sistema são:

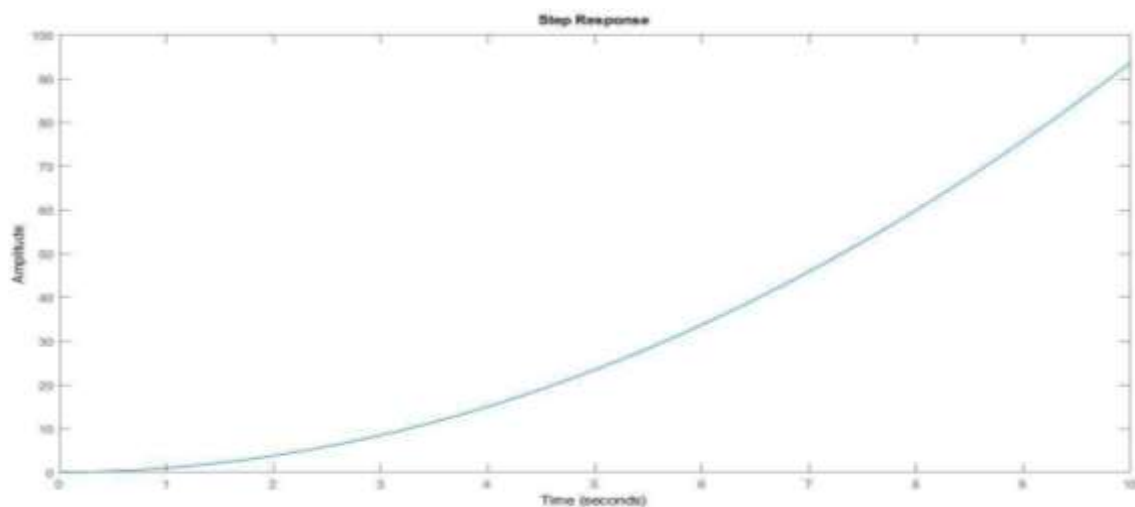
- (m) - Massa da bola: 0,00212 kg;
- (R) - Raio da bola: 0,025 m;
- (d) - Deslocamento do braço de alavanca: 0,16 m;
- (g) - aceleração gravitacional: -9,8 m/s²;
- (L) - Comprimento da viga: 0,60 m;
- (J) - Momento de inércia da bola: 5,3e⁻⁷ kg.m²;
- (R(s)) - Coordenada da posição da bola;
- (α) - Coordenada do ângulo barra;
- (θ) - Coordenada do ângulo servo;

Substituindo os valores destas constantes em na equação (12), temos:

$$G(s) = \frac{1,87}{s^2} \quad (11)$$

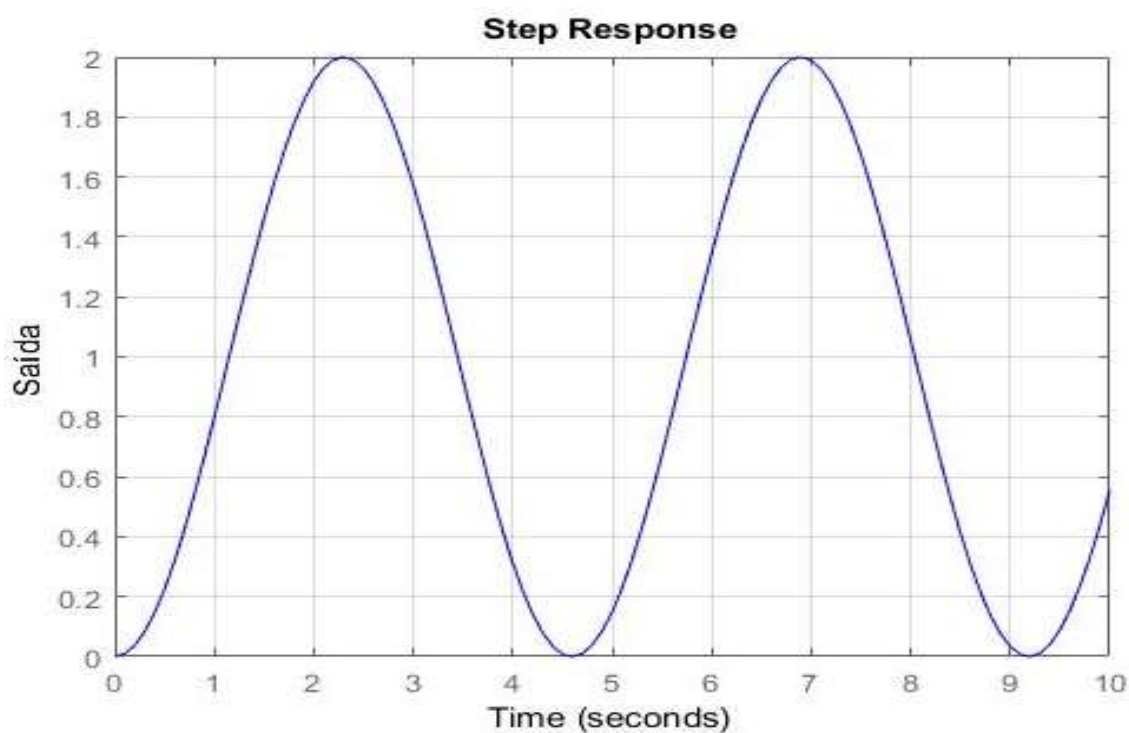
Pode ser visto que a função de transferência da planta é dita marginalmente estável, pois possui um integrador duplo. Tendo a função de transferência da planta, os dados serão inseridos no Matlab para verificar o comportamento da planta e por fim darmos início ao projeto do controlador. A Figura 10- Resposta da Planta em Malha Aberta Figura 10 e Figura 11 representam a planta em malha aberta e malha fechada, respectivamente.

Figura 10- Resposta da Planta em Malha Aberta



Fonte - Autor

Figura 11-Resposta da Planta em Malha Fechada



Fonte - Autor

Como podemos observar nas figuras acima, a planta é instável em malha aberta e em malha fechada, devido a posição dos polos de sua função de transferência que estão localizados sobre o eixo imaginário tornando a planta marginalmente estável. Por esta razão escolheu-se um controlador PID na tentativa de controlar este sistema.

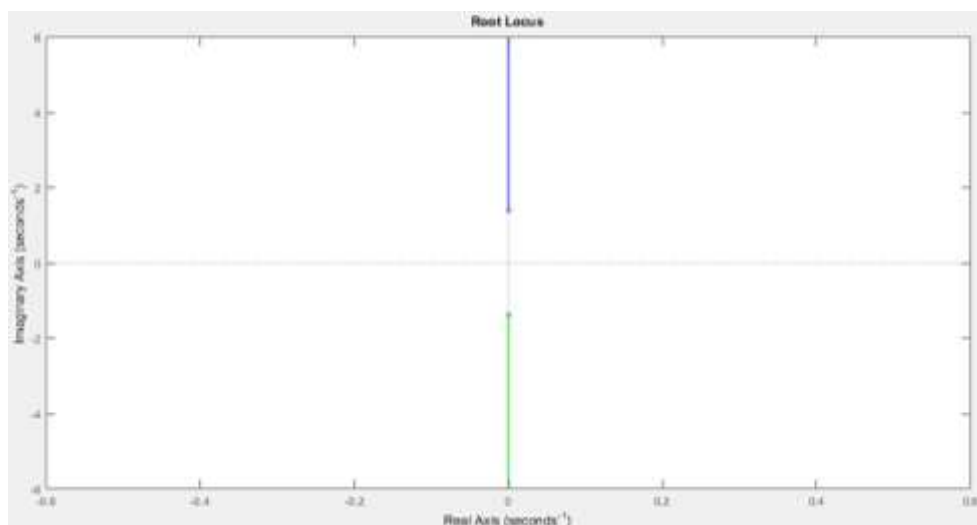
3.2 PROJETO DE CONTROLADOR

Visto anteriormente, o sistema é instável tanto em malha aberta quanto em malha fechada, logo para dar início ao projeto do controlador devemos considerar os critérios de projeto estabelecidos de: 1 – Tempo de acomodação inferior a 2 segundos e; 2 – Overshoot inferior a 5%.

Em termos de Controlador PID, deve-se atentar para o ajuste do ganho proporcional, dado que aumentar demais o ganho proporcional faz com que o processo estabilize., entretanto, abaixo do setpoint. Diminuir o ganho causará a estabilização do sistema mais próximo ao setpoint, mas uma redução excessiva pode causar a instabilidade do processo. A ação integral tem o efeito de eliminar o desvio característico de um controle puramente proporcional, ou seja, a ação integral tem o objetivo de eliminar o erro em regime permanente, e a adoção de um termo integral muito alto pode levar o processo à instabilidade. Já a adoção do termo integral excessivamente pequeno, pode retardar a estabilização do processo. A ação derivativa consiste em uma resposta proporcional à velocidade de variação do erro, evitando que se eleve ou reduza a ação de controle de modo a melhorar o desempenho do processo durante os regimes transitórios. O Termo derivativo só atua quando há variação no erro, ou seja, se o processo estiver estável, seu efeito ou ação será nulo. Se a constante proporcional for pequena, há grande chance de ocorrer sobressinal, ou ‘Overshoot’, onde o sinal de controle ultrapassa o setpoint.

A característica básica de um sistema em malha fechada depende essencialmente da localização dos seus polos em malha fechada, então podemos dizer que dependendo da localização dos polos do sistema, ele pode se comportar de uma forma específica. Por exemplo para um sistema de segunda ordem ser estável, os seus polos devem estar localizados do lado esquerdo do eixo real, ou seja, a parte real deve ser negativa. Para isto, vamos verificar o lugar geométrico das raízes em tempo contínuo da planta de estudo deste trabalho que pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - LGR da Planta Barra e Bola

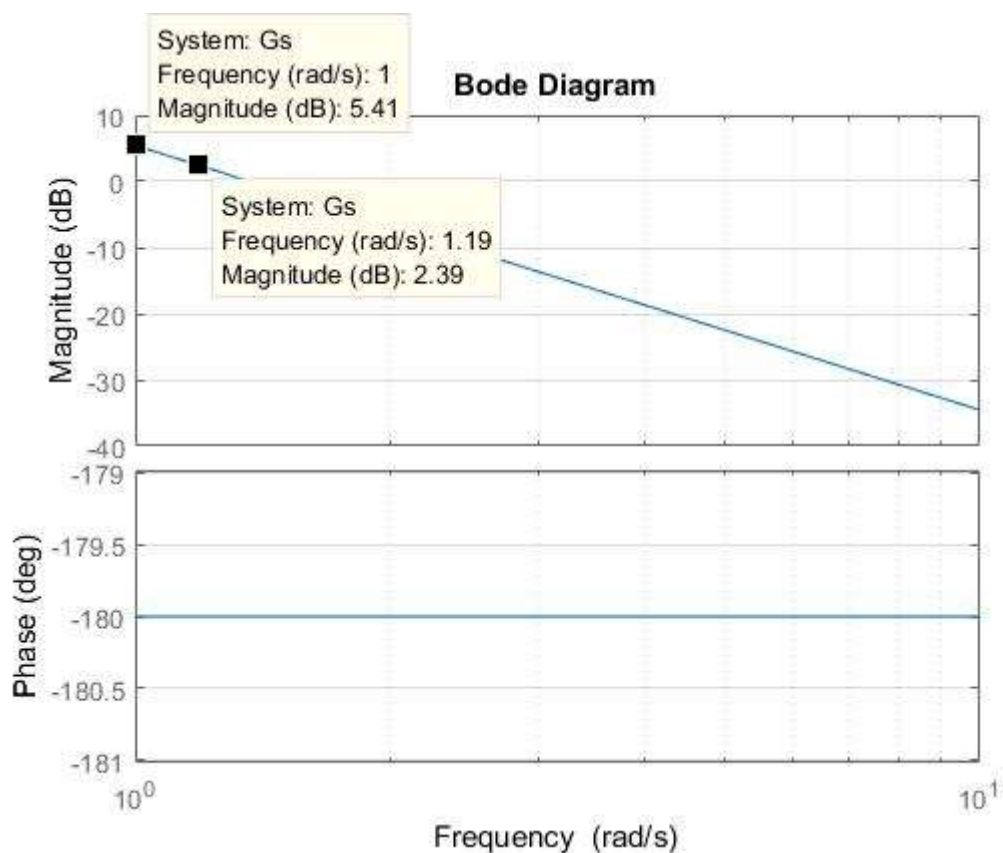


Fonte – Autor

Como dito anteriormente, o sistema se comporta marginalmente estável, e para que se torne estável iremos projetar um controlador PID. Primeiramente devemos discretizar a planta para podermos aplicar o controlador. Então, devemos definir o período de amostragem T do sistema a ser controlado, pois o mesmo influencia na resposta transitória do sistema em tempo discreto afetando a posição dos polos no plano Z .

Segundo o teorema de Shannon, para poder recuperar o sinal original e sem distorção, a frequência de amostragem deve ser pelo menos duas vezes maior que todas as frequências presentes no espectro do sinal original. Para encontrarmos a frequência de corte e a partir da mesma obtermos o tempo de amostragem, obteve-se o diagrama de Bode que pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Diagrama de Bode da Planta



Fonte - Autor

Após encontrar a magnitude (dB) na frequência zero, como mostrado na Figura 13 temos que:

- Frequência (rad/s) = 1
- Magnitude (dB) = 5,41

Utilizando o comando de conversão ‘db2mag()’ no Matlab, encontramos a magnitude. Utiliza-se 70,7% deste valor de magnitude, e em seguida convertemos para decibéis utilizando o comando de conversão ‘mag2db’, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Magnitude na Frequência Zero e Magnitude na Frequência de Corte

```
>> Magnitude=db2mag(5.41)

Magnitude =

    1.8642

>> Porc_70=0.707*Magnitude

Porc_70 =

    1.3180

>> decibeis=mag2db(Porc_70)

decibeis =

    2.3984
```

Fonte - Autor

Devemos encontrar este valor em decibéis no diagrama de bode da Figura 13 e o valor da frequência nesta magnitude é a frequência de corte do sistema. Portanto:

- Frequência (rad/s) = 1,19
- Magnitude (dB) = 2,39

A frequência nesta magnitude é a frequência de corte do sistema. Logo:

$$W_c = 1,19 \text{ rad/s}$$

Pelo teorema de Shannon, temos:

$$T \leq \frac{\pi}{1,19} \therefore T \leq 2,64s \quad (12)$$

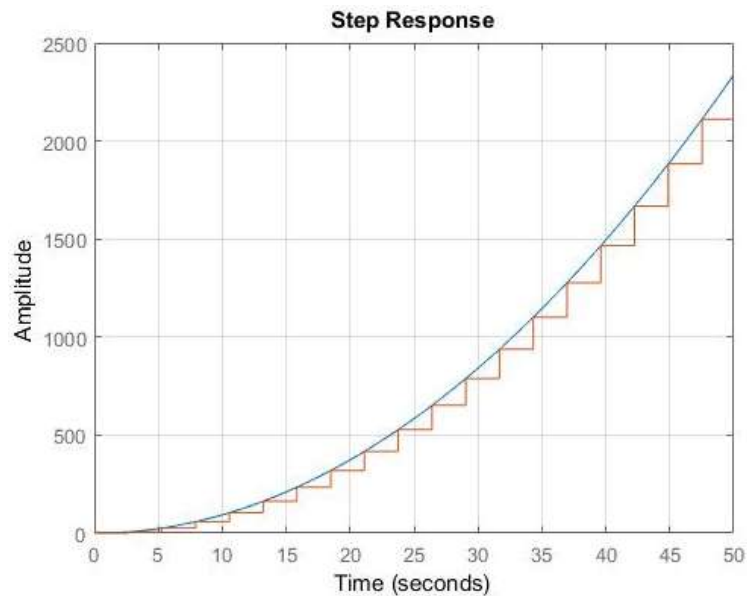
Optou-se em utilizar o menor tempo de amostragem no qual seja viável sua implementação no algoritmo de controle.

A planta foi discretizada pela aproximação de ZOH para analisar a resposta do sistema, utilizando a função de conversão do matlab ‘c2d()’ que converte uma planta contínua em uma planta discreta através de um discretizador, que neste caso foi o segurador de ordem zero, ou ZOH.

$$G(z) = \frac{6.5165(z+1)}{(z-1)^2} \quad (13)$$

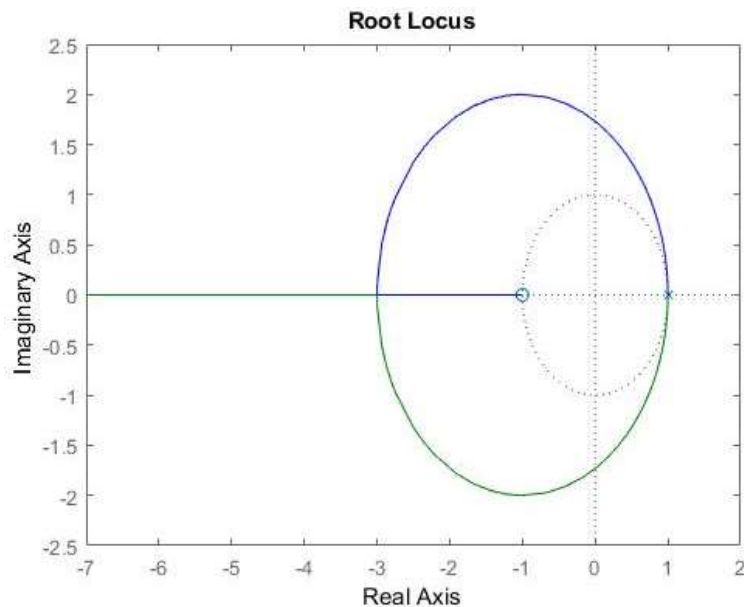
Para verificar se a discretização foi satisfatória, obteve-se a resposta ao degrau unitário da planta discretizada sobreposta a planta contínua em malha aberta. Na sequência, o Lugar das Raízes da planta discretizada é mostrado.

Figura 15 - Resposta ao Degrau Unitário do Sistema Contínuo e Discreto em Malha Aberta



Fonte - Autor

Figura 16 - LGR da Planta Discreta

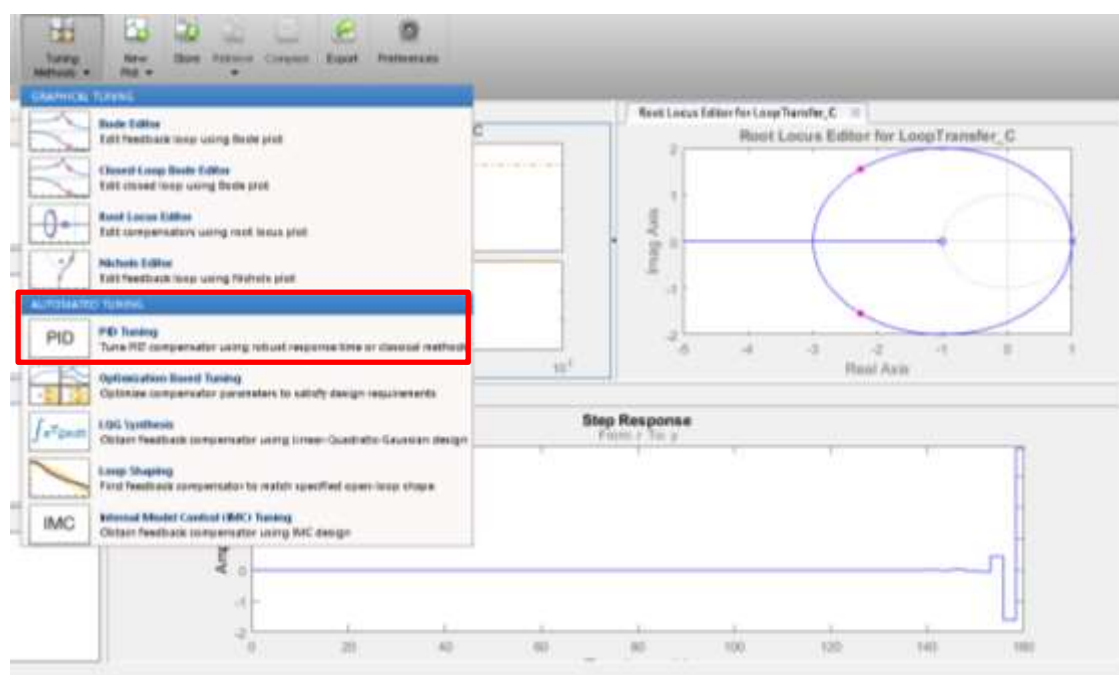


Fonte - Autor

A resposta ao degrau e o LGR mostram que a planta continuou marginalmente estável após a discretização, ou seja, o tempo de amostragem e o método de discretização foram satisfatórios pois manteve as características da planta de tempo contínuo.

Após a discretização da planta, vamos aplicar o controlador PID para tornar a planta estável e para isto, utilizou-se a ferramenta do Matlab chamada 'controlSystemDesigner()' aplicada na planta discretizada. Esta ferramenta exibe o gráfico do LGR da planta discretizada, a mesma vista na Figura 16, e também um toolbox de sistemas de controle do matlab, onde é possível utilizar diversos métodos de sintonia como métodos gráficos e métodos automatizados. Utilizou-se o método automatizado para o PID como pode ser visto na Figura 17.

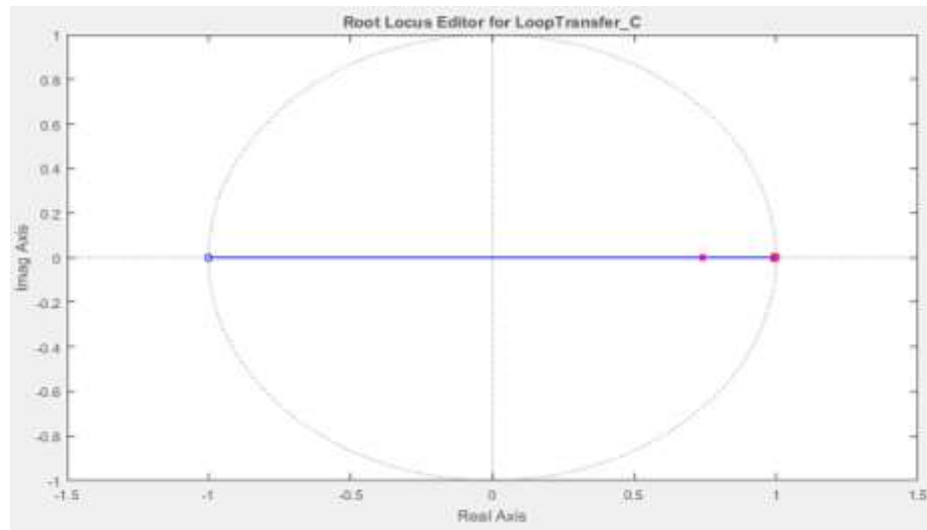
Figura 17 - Toolbox Para Controle de Sistemas do Matlab



Fonte - Autor

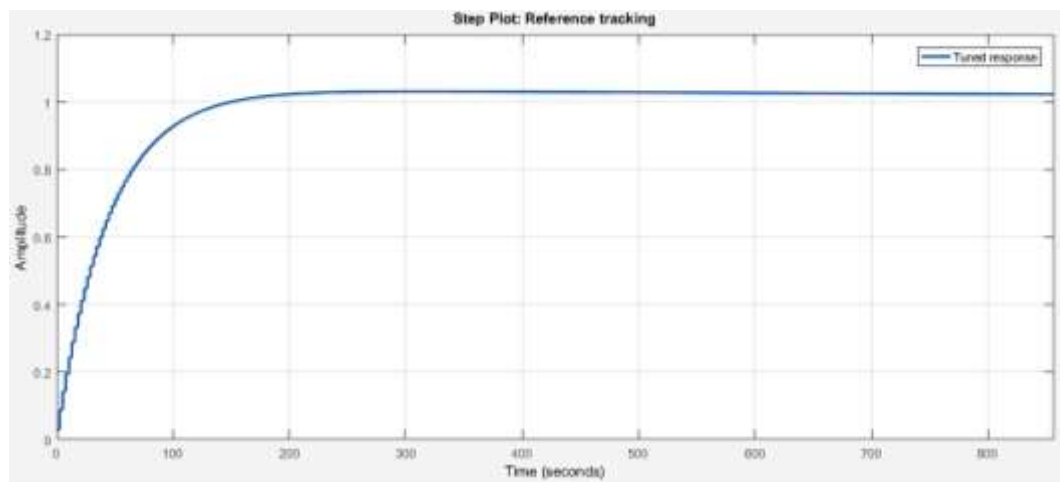
Tendo definido o método de sintonia, uma segunda janela é aberta onde configura-se o tipo de controlador que desejamos. Neste submenu há opção de escolhermos se o controlador será um proporcional, proporcional-integral, proporcional-derivativo ou o proporcional-integral-derivativo, um filtro derivativo de primeira ordem e se o projeto do controlador se dá em tempo discreto ou tempo contínuo. Para nosso projeto, foi selecionado a opção PID, sem filtro derivativo, e o projeto do controlador se dará em tempo discreto, ou seja, na escala da frequência. A sintonia do controlador PID se dará pela largura de banda e fase. Os resultados são compensados diretamente em nossa planta, juntamente com a exibição do LGR da planta e a resposta ao degrau. O LGR da planta compensada pode ser vista na Figura 18, bem como a resposta ao degrau da planta compensada na Figura 19.

Figura 18 - LGR da Planta Compensada



Fonte - Autor

Figura 19 - Resposta ao Degrau da Planta Compensada



Fonte - Autor

Podemos ver que a planta compensada tem agora o plano Z como região de convergência e não mais a região externa do círculo Z. A Resposta ao degrau do sistema tende à estabilização. Os parâmetros iniciais de projeto foram atendidos e a planta compensada agora é estável com a adição de alguns zeros dentro da região de Z.

Figura 20 - Parâmetros e Performance do Controlador

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	1.0201e-05
Ki	2.0825e-09
Kd	0.012492
Tf	n/a
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	87.1 seconds
Settling time	1.04e+03 seconds
Overshoot	3.05 %
Peak	1.03
Gain margin	-41.2 dB @ 0.000409 rad/s
Phase margin	88 deg @ 0.0233 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Fonte - Autor

3.3 PROJETO MECÂNICO

Objetivando melhorar a aparência do sistema, foi utilizada uma impressora 3D de modelo Cloner DH+, que funciona com preenchimento de camadas até que se forme a peça final utilizando como método a extrusão de um material de plástico denominado PLA (Poliácido Láctico) com filamento de 1,75mm. A Figura 21 mostra a impressora utilizada na confecção das peças mecânicas do projeto.

Figura 21 - Modelo da Impressora 3DCloner DH+



Fonte – Site 3D Cloner

Com o auxílio do software CAD (do inglês, Computer Aided Design) Inventor da empresa AutoDesk, versão student 2018, foi possível desenvolver as peças que compõem o projeto mecânico. A Figura 22 mostra a como será a montagem da parte mecânica do projeto.

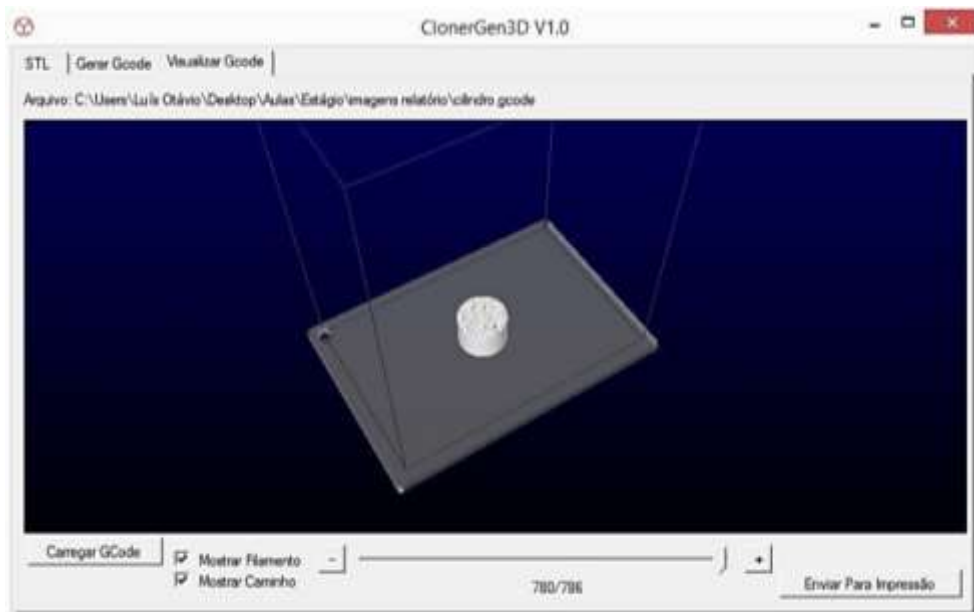
Figura 22 - Desenho em 3D da Planta Barra a e Bola



Fonte - Autor

A partir do desenho feito em 3D de cada peça individual, as mesmas foram exportadas para a extensão 'stl' para a impressão. Para realizar a impressão foi utilizado o software ClonerGen3D disponibilizado pelo fabricante da impressora. A tela inicial do software pode ser vista na Figura 23. Para iniciar a impressão, a opção 'Abrir a Peça' deve ser selecionada, será aberto um submenu para localização do arquivo 'stl' anteriormente salvo. Escolhida a peça, deve-se selecionar o modelo da impressora (Modelo DH) e a posição com reação as coordenadas x, y e z em que a peça será impressa.

Figura 23 - Tela Inicial do Software CLonerGen3D



Fonte - Autor

A próxima etapa é gerar o Gcode da peça. O Gcode é um dos tipos de linguagem de programação de controle numérico mais utilizados para impressões 3D. Cada linha fornece ao

sistema de controle da impressora uma ação a ser realizada. Figura 24 exibe a tela de configuração para gerar o Código G, apresentando as opções de espessura de cada camada de preenchimento, bem como o tipo do preenchimento, porcentagem de material e etc.

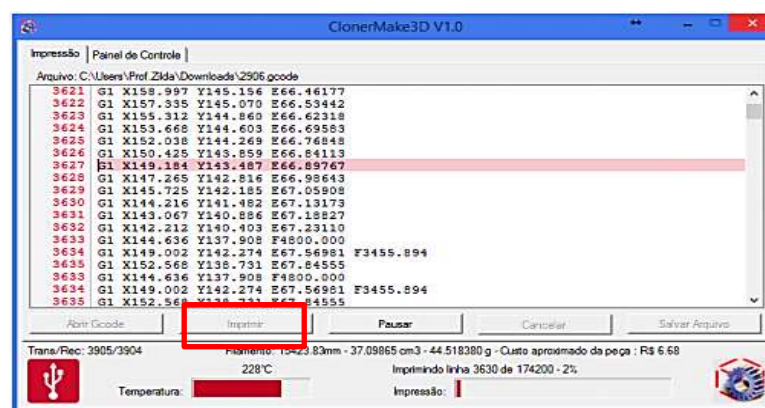
Figura 24 - Tela de Configuração do CódigoG do Software ClonerGen3D



Fonte - Autor

Gerado o Gcode, o software estará pronto para impressão bastando o usuário clicar em Enviar Para Impressão, que em sequência, é aberto o segundo software denominado ClonerMake3d e selecionar a opção ‘imprimir’, como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Tela de Impressão do Software ClonerMake3D



Fonte - Autor

O cabeçote de impressão da impressora 3D começa a aquecer até a temperatura previamente escolhida, e então dá-se início ao processo de impressão das peças. Cada peça deve ser impressa separadamente.

3.4 DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE NO AMBIENTE DO LABVIEW

O desenvolvimento da interface foi dividido basicamente em duas etapas: configurações iniciais do ambiente do Labview e estruturas de comando em loop. As estruturas de comando do código, possuem relação direta com a leitura da posição da bola sobre a barra e o calculo do controlador PID para o controle da posição.

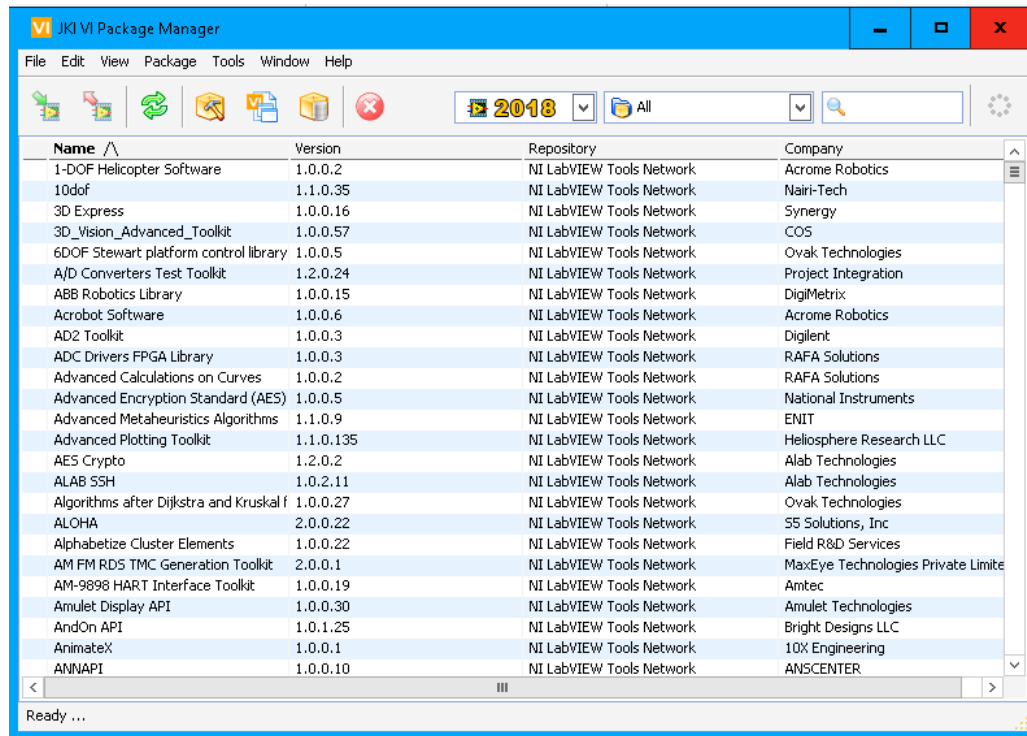
3.4.1 PREPARAÇÃO DO AMBIENTE LABVIEW

Foi feito o download do software Labview através do próprio site da National Instruments, utilizou-se a versão 2018 SPI com o Academic Site License (ASL), que é o instrumento padrão de acesso ao software NI para acadêmicos e estudantes. O ASL permite que os estudantes instalem software NI em seus próprios computadores, podendo desenvolver os seus sistemas fora do laboratório. Tendo instalado o software do Labview o ASL inserido, autorizando o uso do software, é necessário instalar um driver de instrumento chamado NI-VISA.

O NI-VISA é um driver de instrumento da NI que implementa o padrão VISA – (Virtual Instrument Software Architecture) de E/S. O VISA é um padrão para a configuração, programação e resolução de problemas de sistemas de instrumentação, compreendendo interfaces GPIB, VXI, PXI, Serial (RS232/RS485), Ethernet/LXI e/ou USB. (National Instruments, 2019a). Este driver é quem irá permitir a comunicação do Labview com a plataforma Arduino, possibilitando a troca de informações entre o que é solicitado no software e o que é realizado na prática pelo hardware.

Instalado os drivers necessários para a comunicação entre hardware e software, foi necessário a utilização de um toolbox do Labview para configurar o tipo da placa Arduino, configuração de comunicação e instalação de um firmware para receber os comandos provenientes do Labview. O Toolbox pode ser encontrado através do VI Package Manager, que nada mais é do que um software para instalar, atualizar e gerenciar o software da NI. Com ele é possível instalar outros softwares NI disponíveis, instalar pacotes customizados, visualizar recomendações e entre outros. O Ambiente do VI package Manager pode ser visto na Figura 26.

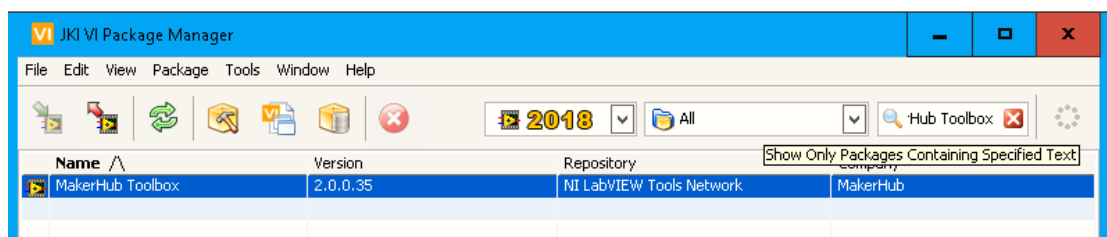
Figura 26 - Ambiente VI Package Manager



Fonte - Autor

Como dito anteriormente, foi necessário utilizar um toolbox para realizar as configurações da placa Arduino. Através do VI Package Manager, no campo de pesquisa procuramos por MakerHub Toolbox e clicamos em ‘instalar’, para fazer o download do referido toolbox. Este toolbox é utilizado para gravar o firmware na placa Arduino, para que este passe a receber e compreender os comandos enviados do software labview. A Figura 27 mostra o resultado da pesquisa pelo toolbox.

Figura 27 - Busca Pelo Toolbox de Comunicação Com Plataformas Microcontroladas



Fonte - Autor

Seguido todos os passos descritos anteriormenrte, o LabView estará apto a se comunicar com a plataforma Arduino.

3.4.2 ESTRUTURAS DE COMANDO EM LOOP

Ao abrir o software do Labview, o sistema dará a opção de criação de um novo projeto. Criado o projeto, as telas do painel frontal e do diagrama de blocos estarão limpas e disponíveis para programação e criação dos VIs. ao clicar com o botão direito do mouse, como mostrado na Figura 8, será exibido a paleta de funções e uma das opções deste submenu é o toolbox de Simulação e controle, onde estão disponíveis diversas estruturas de PID. O SubVI escolhido para este trabalho foi a PID.Advanced.vi, mostrada na Figura 28.

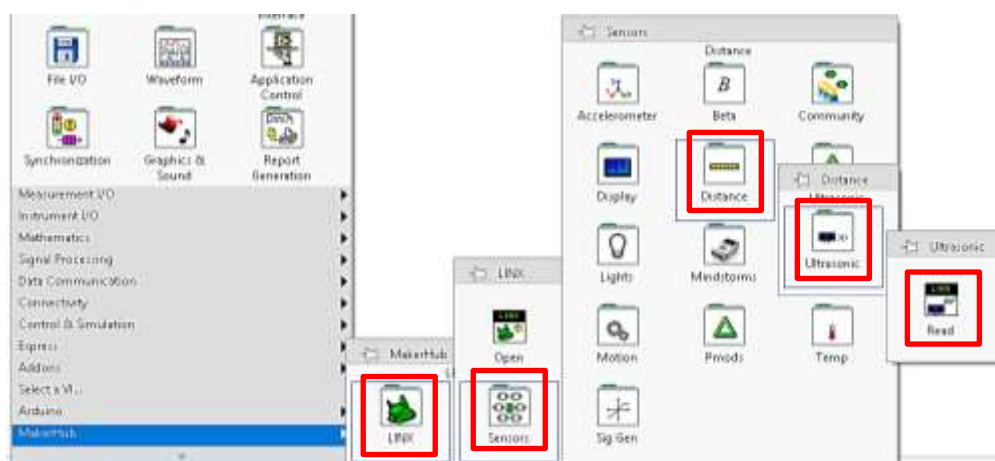
Figura 28 - Estrutura PID Escolhida Para o Projeto



Fonte - Autor

Este SubVI nos permite configurar setpoint, faixa de saída, faixa do setpoint, os ganhos do controlador PID, resetar o controlador, definição entre controle manual e automático, tempo de saída, e entre outras opções de um controlador PID avançado. Para a leitura da posição da bola foi utilizado um sensor ultrassônico. O Toolbox da MakerHub possui alguns transdutores comumente utilizados com a plataforma Arduino como transdutores de distância, temperatura, movimento e etc. Para este projeto, utilizamos um transdutor de distância HC-SR04. É necessário a configuração dos pinos ECHO e TRIGGER, que estão presentes no transdutor conforme Figura 29.

Figura 29 - Seleção do Sensor de Distância no Toolbox MakerHub

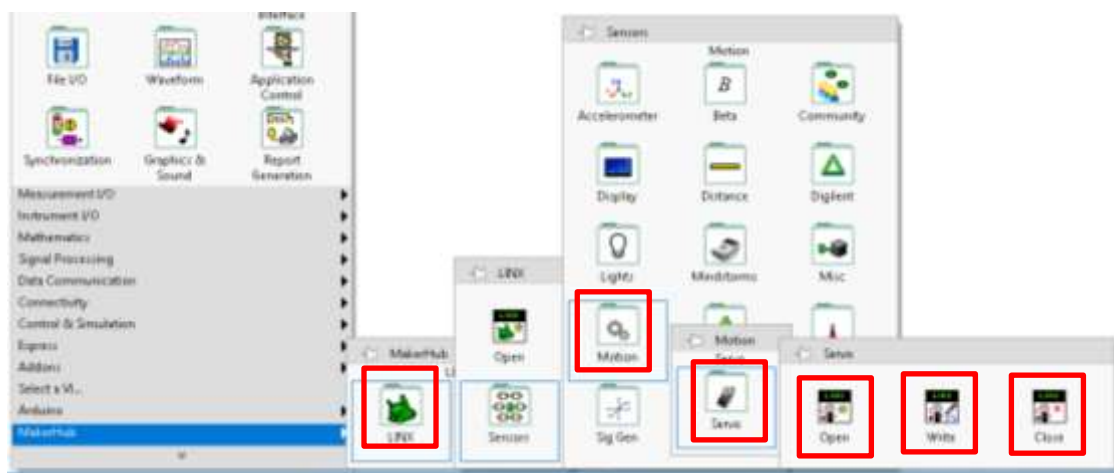


Fonte - Autor

Do mesmo modo que os sensores, o Toolbox da MakerHub possui suporte para atuadores como servomotores, motores DC, acionamento de válvulas e entre outros. Como atuador para

este projeto, utilizamos um servomotor Tower Pro MG995 que possui uma entrada para o sinal de controle em microssegundos(us), logo, é necessária uma normalização do sinal do controlador para o sinal em microssegundos, da mesma forma que a função map do arduino. Para iniciarmos a comunicação com o servomotor, é necessário utilizar 3 subVI's disponíveis, conforme Figura 30. O primeiro denominado de OPEN para iniciar a comunicação e definição do pino de controle, o segundo denominado WRITE que também contém entrada para a definição do pino de controle e a entrada do sinal de controle. A definição do pino de controle já nos apresenta que é possível utilizar mais de um servomotor num mesmo projeto. O Último subVI é chamado de CLOSE. Este nome nos remete à função na qual descreve o nome do mesmo, que é o encerramento da comunicação com o objeto servo.

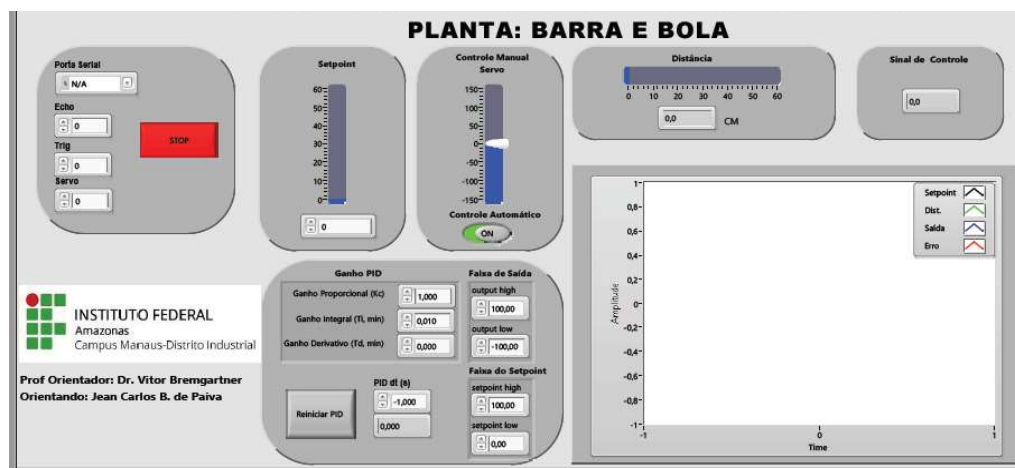
Figura 30 - Seleção do Atuador Servomotor no Toolbox Makerhub



Fonte - Autor

Como dito anteriormente, cada item da paleta de controle tem seu nó no diagrama de blocos. Dito isto, basta montar a interface com o usuário bem como queira. A interface projetada no painel de controle do labview para este trabalho é apresentada na Figura 31.

Figura 31 - Interface da Plataforma Educacional



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todas as partes desenvolvidas na ferramenta de CAD Inventor foram salvas em um pen drive, para posteriormente serem impressas. Todas as peças foram impressas utilizando a impressora 3D disponibilizada no IFAM – CMDI, apresentando ótima rigidez e qualidade de impressão.

Tendo impressas as partes que compõe a estrutura do projeto, as peças foram unidas por parafusos e porcas. A plataforma Arduino, o servo motor e sensor ultrassônico foram fixados à parte estrutural do projeto. A Figura 32 mostra a montagem final da planta barra e bola.

Figura 32 - Montagem Final da Parte Estrutural



Fonte - Autor

Como apresentado em tópicos anteriores, a comunicação da interface desenvolvida com a planta é feita através de um firmware que permite a troca de informações da plataforma arduino com a interface desenvolvida. Como a plataforma arduino utilizada neste projeto é a UNO, logo, foi selecionado a versão correspondente. A Figura 33 mostra a o layout do driver utilizado neste projeto.

Figura 33 - Seleção Do Tipo De Plataforma Arduino Na Interface do Makerhub



Fonte - Autor

Consequentemente, faz-se necessário informar ao Makerhub qual a porta serial que está sendo utilizada pela plataforma Arduino. A Figura 34 demonstra esta fase do processo. Em sequência, o firmware é instalado no arduino e a plataforma está pronta para ser utilizada pela interface desenvolvida em Labview.

Figura 34- Seleção Da Porta Serial Em Que Se Encontra a Plataforma



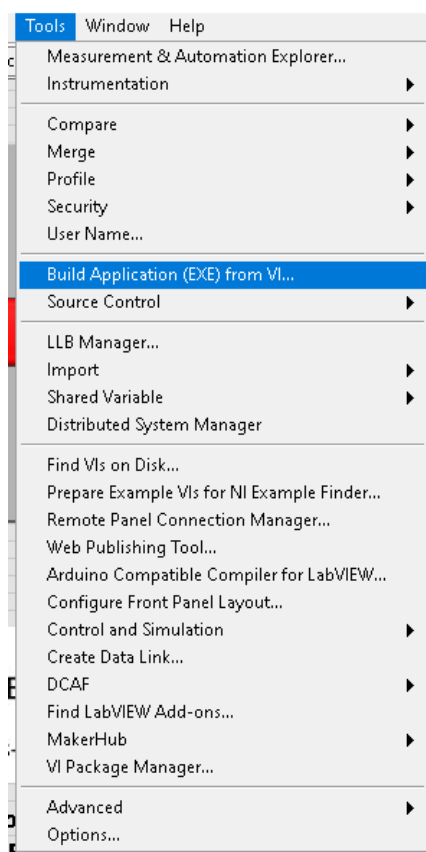
Fonte - Autor

Após estas configurações de firmware estarem prontas, basta inserirmos o cabo serial do arduino na porta USB do computador para inicializarmos a plataforma educacional.

A formatação final de interface da plataforma educacional apresentou resultados satisfatórios, onde podemos observar os sinais provenientes da planta como: Distância real da bola, Sinal de controle, Setpoint e Erro. A plataforma apresenta um identificador do Instituto Federal do Amazonas, além de botões de configuração do sensor, servo motor, plataforma arduino, ajuste do controlador, movimento automático e manual do servomotor e etc.

O executável da plataforma foi gerado através do próprio Labview, via submenu “Tools” (Ferramentas) e selecionar a opção de criação de aplicação a partir do Instrumento Virtual desenvolvido. A Figura 35 mostra a ferramenta utilizada para criação da aplicação da interface desenvolvida.

Figura 35 - Opção Da Ferramenta Labview Para Criação De Aplicações



Fonte - Autor

A plataforma desenvolvida pode ser dita de baixo custo, pois utilizou-se de ferramentas simples e de fácil aquisição. A Tabela 3 mostra o levantamento de custos para o desenvolvimento do projeto.

Tabela 3 - Orçamento do Projeto

Material	Quantidade	Fornecedor	Custo (R\$)
Arduíno Uno	01	Aliexpress	18,00
Sensor Ultrassônico HC-SR04	01	Arduino Manaus	20,00
Cantoneira 3/4	1 m	Casa das Correias	6,50
Jumpers	10	Arduino Manaus	5,00
Servo Motor Tower Pro MG995	01	Arduino Manaus	45,00
Impressões 3D (PLA)	06	IFAM	27,68
Total			122,18

Fonte - Autor

Em vista de uma comparação com plataformas comercializadas atualmente, duas empresas foram contactadas: ACC Motion Solutions e a Mindiamart. Infelizmente, a empresa Mindiamart não retornou às informações a cerca da plataforma comercial vendida e a ACC Motion Solutions respondeu às informações requeridas. A Tabela 4 exhibe as especificações da plataforma educacional vendida pela empresa em questão.

Tabela 4 - Especificações da Plataforma Educacional Comercializada pela ACC Motion Solutions

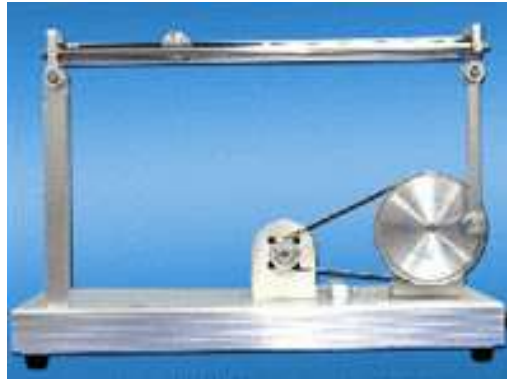
Part Number	GBB2004
Moving Range	400 mm
Ball Diameter	30 mm
Control Precision	< 5mm
Motor	DC servo 70 w
Synchronous belt reduction ratio	AC220V 50 Hz 1A (AC110V optional)
Weight	< 10 kg
Dimension	530 x 200 x 322 mm

Fonte - Adaptado de Acc Motion Solutions (2020a)

A plataforma comercializada pode ser vista na Figura 36 e possui uma estrutura diferente da desenvolvida neste trabalho, entretanto, há diferentes estruturas para a planta barra e bola com modelagem matemática semelhante. Juntamente com a estrutura barra e bola da plataforma educacional comercializada, é fornecido um módulo de controle elétrico, controlador

de movimento, plataforma de desenvolvimento de software IPM Motion studio e um software plataforma de experimentos do Simulink.

Figura 36 - Plataforma Educacional Comercial



Fonte – Adaptado de Acc Motion Solutions (2020b)

Como visto na Tabela 3, o projeto tem um custo baixo em comparação à plataforma comercializada pela Acc Motion Solutions que custa \$3,850,00. Levando em consideração a cotação média de 1 dólar no mês de março que é em torno de R\$ 4,58 o custo pode chegar em R\$ 17.633,00 sem levar em consideração as taxas de importação.

O valor do projeto desenvolvido neste trabalho chega a ser menor que 1% do valor comercializado pela empresa ACC motion solutions e possuindo resultado próximo do entregue pela plataforma vendida.

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste projeto possibilitou o desenvolvimento de uma plataforma educacional de baixo custo que apresenta características fundamentais para o ensino e estudo de desempenho de sistemas dinâmicos, além de possuir uma interface simples para que os usuários consigam utilizá-la facilmente.

Certamente, uma comparação mais confiável poderia ser realizada se tivéssemos uma plataforma educacional de controle comercial, entretanto, a plataforma educacional desenvolvida apresenta uma funcionalidade razoável, constatada nos testes realizados durante alguns dias de uso, além da flexibilidade de outras estruturas com base na planta barra e bola poderem ser utilizadas com a mesma interface

Plataformas educacionais comerciais, em sua grande maioria, possuem preços elevados e alternativas como a apresentada neste trabalho estão se tornando cada vez mais comuns para viabilizar a fixação do ensino de disciplinas que anteriormente eram vistas apenas nas salas de aula, agora, de forma prática tendo sua contribuição voltada para a experiência e vivência do aluno com o referente tema na qual a plataforma foi desenvolvida.

A plataforma educacional proposta contribui com o suprimento de uma lacuna existente no IFAM que é a falta de uma plataforma de ensino que associe teoria e prática, além da formação dos alunos de uma maneira mais estruturada. O despertar para os entraves existentes nas salas de aula que, com este trabalho, poderá gerar ideias para outros problemas encontrados, aguçando o imaginário dos estudantes e professores para as possibilidades de criação de diversas ferramentas que estão presentes no cotidiano dos ambientes que fazem parte da instituição, até mesmo para problemas da indústria.

Durante a execução do trabalho, surgiram algumas dificuldades que exigiram decisões rápidas como por exemplo o tamanho da bolinha que, se muito pequena, impossibilita a leitura da distância por parte do sensor e se muito grande, fica difícil de controlar dado o peso e o tamanho da viga que sustenta a bola. Na idealização do projeto, a viga utilizada seria uma cantoneira de metal de $\frac{1}{2}$ polegada (1,27 cm), entretanto, houve uma grande dificuldade em encontrar a cantoneira nesta dimensão no mercado e a solução encontrada foi a de utilizar uma cantoneira de $\frac{3}{4}$ polegadas (1,9 cm) e, com a utilização de uma serra, retirar o excedente para que coubesse na base projetada. Feito isto, realizamos o encaixe de forma perfeita e este entrave se apresentou como uma ótima solução, dado que a superfície de $\frac{1}{2}$ polegada talvez fosse muito pequena para que a bola rolasse sobre ela.

Como dito anteriormente, o presente trabalho visa suprir uma necessidade clara dos estudantes em associar a teoria da prática bem como outras plataformas educacionais desenvolvidas, entretanto a desenvolvida neste trabalho apresenta uma interface gráfica que ajuda no entendimento do tópico de ensino em tempo real, podendo ser vistas no momento as modificações de gráficos e valores de sinais de interesse.

Modelos mais simples da plataforma Arduino como a Nano conseguiriam suprir perfeitamente a demanda solicitada pela plataforma, dado que o firmware salvo em sua

memória RAM ocupa pouco espaço e as portas utilizadas são digitais e uma PWM para o controle do servomotor.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, poderá ser desenvolvido um firmware padrão para outras plataformas e que já estejam integrados na plataforma educacional de modo que não seja mais necessário utilizar um driver que faça a conexão entre a plataforma arduino e o programa desenvolvido em Labview.

Outra sugestão seria implementar outras formas de comunicação além da comunicação via porta USB, para maior flexibilidade e abertura para demais projetos voltados para o âmbito educacional, além de realizar experimentos em laboratórios com turmas de disciplinas de sistema de controle.

6 REFERÊNCIAS

OGATA, K **Engenharia de controle moderno**, Tradutora Heloísa Coimbra de Souza; revisor técnico Eduardo Aoun Tannuri.- 5. ed.- São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle modernos**. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

Colon, D. and Diniz, I. (2009). **Teaching and comparing advanced control techniques in a ball and beam didactical plant**, Proceedings of 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brasil.

RAMOS, J; MACHADO, L; NETO, A; SANTOS, M.” **Projeto de Um Sistema Ball and Beam Para o Ensino de Controle Automático**” Congresso Brasileiro de Automática – CBA2016, UFES, Vitória – ES 3-7 de Out.

Froyd, Wank, Smith and Karl (2012). **Five major shifts in 100 years of engineering education**, Proceedings of IEEE pp. 1344{1360.

WANG, W. **Control of a Ball and Beam System**. Final Thesis, Austrália, 2007.

AHRENS, C. H. et al. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2007

Li X. and Yu W., “**Synchronization of Ball and Beam Systems with Neural Compensation**”, International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 8, No. 3, 2010.

Keshimiri, M. et al. **Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches**, INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS, VOL. 5, NO. 1, MARCH 2012

GOMES, D; SALES,F;LIMA,C. “**Radiômetro de Crookes Como Plataforma de Ensino de Controle Digital em Cursos de Engenharia**”, Cobenge, Juiz de Fora – MG, 2014.

ECP EDUCATIONAL CONTROL PRODUCTS. Manuals for Model 205/205a, 220, 730 and 750, 1999.

ALBERNAZ, P.F; ARAÚJO, V; CARLOS, T. M. J; MORAIS, J.S; MORAIS, A.S. “**Kit Didático Para o Ensino da Disciplina de Controle Digital de Processos**”. Núcleo de Controle e Automação, Uberlândia – MG, 2012.

EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. **Arduino em ação**. 1. Ed. São Paulo: Novatec, 2013

CHOI, C; EVANKO, D.; DORSETT, A. **A ball-on-beam system with an embedded controller**. ASEE, Washington DC, 2008

MANTOVANI, S.C.A. **Controle de um Servo Motor**. 2013. EPUSP, 2014

HUI N.B., Sharma P. (2015) **Fuzzy PID Control for Ball and Beam Mechanism**. In: Mandal D., Kar R., Das S., Panigrahi B. (eds) Intelligent Computing and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 343. Springer, New Delhi

EPUSP. **Controle de um servo motor**. 2014. Disponível em: http://www2.pcs.usp.br/~labdig/pdf/files_2014/controle-servo-semesteral.pdf. Acesso em: 9 Jan. 2020

ARDUINO. Arduino UNO. 2020a. Disponível em: <https://www.arduino.cc/> Acesso em: 9 Jan. 2020.

REPOSITÓRIO DA AUTOMAÇÃO. Comportamento dos Sensores Ultrassônicos. 2020^a. Disponível em: < <https://automacaoifrsrg.wordpress.com/2013/07/03/deteccao-de-objetos-com-sensor-ultrassonico-hc-sr04/>>. Acesso em: 10 Jan 2020.

Ball & Beam: System Modeling, 2020a. Disponível em: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=BallBeam§ion=SystemModeling> Acesso em: 12 Jan. 2020

FELIPEFLOP. Servo TowerPro MG995 Metálico. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/servo-towerpro-mg995-metalico/> Acesso em: 12 Jan. 2020

COSTA, C. **Introdução ao LabView**. 2020b. Disponível em: [http://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/introducao_ao_labview_em_6_horas%20\(2\).pdf](http://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/introducao_ao_labview_em_6_horas%20(2).pdf) Acesso em: 17 Dez. 2019

3DCLONER. Disponível em: <<http://www.3dcloner.com.br>> Acesso em: 20 Jan. 2020.

WELLSTEAD, P. **Ball and beam 1: Basics**. 2000. Disponível em <<http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/ball-and-beam1.pdf>>. Acesso em: 08 Jan. 2020.

ACC MOTION SOLUTIONS, **GBB 2004 Ball and Beam System**. Disponível em: <https://acc-motion-solutions.myshopify.com/products/gbb2004> Acesso em: 10 Mar. 2020.

APÊNDICES

PROPROGRAMAÇÃO LABVIEW

