

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
CAMPUS PATOS DE MINAS

LUIS ANTONIO VIEIRA VITAL

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA
BALL AND PLATE UTILIZANDO CONTROLADOR PID COM
DETECÇÃO POR *TOUCHSCREEN***

Patos de Minas - MG
2019

LUIS ANTONIO VIEIRA VITAL

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA
BALL AND PLATE UTILIZANDO CONTROLADOR PID COM
DETECÇÃO POR *TOUCHSCREEN***

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito de avaliação da disciplina de TCC2 da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa Ramos

LUIS ANTONIO VIEIRA VITAL

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA
BALL AND PLATE UTILIZANDO CONTROLADOR PID COM
DETECÇÃO POR *TOUCHSCREEN***

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito de avaliação da disciplina de TCC2 da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa Ramos

Patos de Minas, 14 de agosto de 2019

Banca Examinadora

Prof. Dr. Daniel Costa Ramos – FEELT/UFU (Orientador)

Prof^ª. Dr^a. Karine Barbosa Carbonaro – FEELT/UFU (Membro 1)

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos – FEELT/UFU (Membro 2)

RESUMO

A grande maioria dos sistemas de controle industriais utiliza técnicas desenvolvidas após anos de estudo e testes, seja por meio de simulações ou de aplicação em protótipos. É extensa a quantidade de dispositivos para estudo, ensino e aprimoramento de técnicas de controle. Dentre esta diversidade, o sistema conhecido como *Ball and Plate* (Bola e Placa) é um dos mais completos para estudo de controle. O objetivo prático de um sistema *Ball and Plate* é o controle e equilíbrio de uma esfera livre para rolar sobre uma superfície plana inclinável que atende ao comando de servo motores. Este projeto está sendo desenvolvido com o propósito de estudar, aperfeiçoar e promover o pleno desenvolvimento de um sistema de controle dinâmico de bola e placa (*Ball and Plate*) voltado ao ensino, aprendizagem e testes das técnicas de controle aplicadas à sistemas de larga escala do mundo real. Buscando atender aos requisitos de desempenho no processo de detecção da esfera, foi adotada como elemento sensor uma tela sensível ao toque (*touchscreen*) sobre a qual a esfera se desloca. As informações de deslocamento são entregues a um sistema de controle dinâmico que calcula a melhor resposta necessária para garantir o equilíbrio do objeto sobre a placa. Como ferramentas auxiliares ao processo de desenvolvimento, a modelagem matemática e a simulação em software revelaram-se importantes indicadores de desempenho do protótipo a ser construído. Os resultados obtidos neste sistema serão comparados com um sistema de *Ball and Plate* utilizando visão computacional, demonstrando que o novo sistema teve um melhor desempenho em relação ao anterior.

Palavras-chave: *Ball and Plate*. Sistema de Controle Dinâmico. PID. *Touchscreen*.

ABSTRACT

The great majority of industrial control systems use control techniques developed through years of study and which are tested by simulation and prototype application. There is a big amount of devices used for studying, teaching and improving control techniques. Within this diversity, the system known by *Ball and Plate* is one of the most complete to support the control studies. The practical aiming of this system is the control and equilibrium of a sphere free to roll on a flat tiltable surface which responds to servo motors commands. This project is being developed aiming to study, improve and promote the plain development of a ball and plat dynamical control system in order to support teaching learning and technical control testing, applied to real world's large scale systems. In order to comply with to the requirements of the sphere detection's performance, a *touchscreen* was used as the element over which the ball moves. The information about its displacement are delivered to a PID system control, which calculate the better output to make sure about the balance over the plate. The mathematical model and software simulation were considered as supporting tools to the development process, reveling themselves as important performance indicators of the building prototype. The results of this systems will be compared with another *Ball and Plate* system which uses computing vision, with the purpose of analyzing and quantifying the new system performance.

Keywords: *Ball and Plate. Dynamic Control System. PID. Touchscreen.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta.	23
Figura 2 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.....	24
Figura 3 - Resposta a um degrau unitário e seus parâmetros.	26
Figura 4 - Sistema com controle PID na presença de distúrbio e ruído	28
Figura 5 - Sistema <i>Ball and Plate</i>	31
Figura 6 - Sistema <i>Ball and Plate</i> com detecção por câmera de vídeo.	33
Figura 7 - Aspecto geral do sistema <i>Ball and Plate</i> com detecção por visão computacional. .	34
Figura 8 - <i>Ball and Plate</i> com sensoramento por <i>touchscreen</i>	35
Figura 9 - Painel <i>touchscreen</i> resistivo	37
Figura 10 - Aspecto elétrico de <i>touchscreen</i> 4 vias.....	37
Figura 11 - Tela <i>touchscreen</i> resistiva de 15'' e suas conexões.....	38
Figura 12 - Aspecto elétrico de <i>touchscreen</i> 5 vias.....	39
Figura 13 - Malha resistiva e seus eletrodos.	40
Figura 14 - Gradiente de potencial na direção x.....	41
Figura 15 - Gradiente de potencial na direção y.....	41
Figura 16 - Forma de onda senoidal adicionada de ruído e sua forma filtrada.	43
Figura 17 - Servo motor típico.	44
Figura 18 - Sinal PWM de controle de um servo típico.	45
Figura 19 - Posição estabelecida de acordo com o ciclo ativo do sinal PWM. Em (a), para pulsos de 1ms, ângulo de 0°. Em (b), para pulsos de 1,5ms, ângulo de 90°. Em (c), para pulsos de 2m, ângulo de 180°.	45
Figura 20 - Placa de desenvolvimento Arduino Due.....	47
Figura 21 - Deslocamento de uma esfera maciça sobre a placa em rolamento suave.....	49
Figura 22 - Função sinc.	51
Figura 23 - Mapa de polos e zeros da função de transferência em malha aberta.	53
Figura 24 – Resposta a um degrau unitário em malha aberta.....	53
Figura 25 - Mapa de polos e zeros da função de transferência em malha fechada.	54
Figura 26 - Resposta à um degrau unitário em malha fechada.....	55
Figura 27 - Diagrama de Blocos Conceitual do Projeto.....	59
Figura 28 - Peças do sistema <i>Ball and Plate</i> , cortadas e furadas.	60
Figura 29 - Estrutura mecânica do Sistema <i>Ball and Plate</i>	62
Figura 30 - conjunto <i>touchscreen</i> /placa acrílica/articulação do pivô.	63

Figura 31 - Esfera aço cromo 35mm de diâmetro.	63
Figura 32 - Diagrama esquemático do sistema.....	64
Figura 33 - Projeto e confecção da placa de circuito impresso.	67
Figura 34 - Principais periféricos e conexões da placa eletrônica.....	67
Figura 35 - Acoplamento da placa auxiliar com o Arduino Due.....	68
Figura 36 - Placa final do <i>Ball and Plate</i> montada e acoplada.....	68
Figura 37 - Indicação da fiação do <i>touchscreen</i> , servos e alimentação.....	69
Figura 38 - Interface do sistema desenvolvida no Virtuino.	76
Figura 39 - Aspecto geral do protótipo, vista inferior.	79
Figura 40 - Aspecto geral do protótipo, vista superior e vista da entrada da fonte.	79
Figura 41 - Performance de traçado orbitando um dos 5 pontos fixos predefinidos.....	81
Figura 42 - Correção da efeito de torção do protótipo.	82
Figura 43 - Tela do sistema de trimagem manual.	83

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Características da resposta em função da localização dos polos.....	27
Quadro 2 - Principais características das ações do PID.....	29
Quadro 3 - Pinos utilizados para <i>Touchscreen</i>	71
Quadro 4 - Código de leitura dos valores dos eixos.	72
Quadro 5 – Fragmento de código do PID.....	73
Quadro 6 - Código de saída do PID para os sevos.	74
Quadro 7 - Constantes de centralização e ajuste fino.	74
Quadro 8 – Função de implementação do filtro de média móvel.....	75
Quadro 9 – Código de inicialização de valores no Virtuino.....	77
Quadro 10 – Código da função PAUSE.	77
 Tabela 1 - Preços dos hardwares utilizados.....	 56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DC	<i>Direct Current</i>
GUI	<i>Graphics User Interface</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IHM	<i>Interface Homem-Máquina</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITO	<i>Indium Tin Oxide</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
PI	<i>Proportional Integral</i>
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 TEMA DO TRABALHO	16
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO.....	16
1.3 HIPÓTESES.....	18
1.4 OBJETIVOS.....	18
1.5 JUSTIFICATIVAS.....	19
1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
CAPÍTULO 2	22
2 REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 SISTEMAS DE CONTROLE	22
2.2 O CONTROLADOR PID	28
2.3 SINTONIA	30
2.4 O SISTEMA <i>BALL AND PLATE</i>	31
2.5 TELAS SENSÍVEIS AO TOQUE (<i>TOUCHSCREEN</i>)	35
2.6 SERVO MOTORES.....	44
2.7 SISTEMAS EMBARCADOS E A PLATAFORMA ARDUINO	46
CAPÍTULO 3	48
3 MODELAGEM DE UM SISTEMA <i>BALL AND PLATE</i>	48
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA	48
3.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA	52
CAPÍTULO 4	56
4 MATERIAIS E MÉTODOS	56
4.1 MATERIAIS E CUSTOS	56
4.2 METODOLOGIA	57
CAPÍTULO 5	59
5 DESENVOLVIMENTO.....	59
5.1 ESTRUTURA MECÂNICA	60
5.2 ESTRUTURA ELETRÔNICA	64
5.3 SOFTWARE EMBARCADO E FUNCIONALIDADES.....	70
5.4 INTERFACE GRÁFICA	75
CAPÍTULO 6	79
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	79

6.1	OPERAÇÃO E DESEMPENHO DO SISTEMA	80
6.2	FUNÇÕES ADICIONAIS	82
6.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE DETECÇÃO POR VISÃO COMPUTACIONAL E <i>TOUCHSCREEN</i>	84
CAPÍTULO 7		86
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
REFERÊNCIAS		88
ANEXOS		91

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Os desafios do mundo moderno impõem ao homem a necessidade de constante aprimoramento na sua forma de agir e interagir com o mundo à sua volta. A ciência e a tecnologia são ferramentas valiosas aliadas à inteligência humana na busca de soluções de problemas do cotidiano que venham garantir melhor qualidade de vida ao homem.

A engenharia de controle vem ao longo dos tempos empreendendo notáveis esforços para oferecer ao homem sistemas de transporte de carga e passageiros destinados aos mais variados segmentos da atividade humana, oferecendo segurança, rapidez e bem-estar de forma a atender a demanda sempre crescente da população mundial. Façanhas como a construção de túneis submarinos, navios transoceânicos e sondas espaciais são alguns dos numerosos legados da atividade laboriosa da engenharia de sistemas de controle.

Contextualizando essa ideia, podemos citar a notável contribuição do engenheiro russo-americano Nicolas Minorsky, que em 1922 desenvolveu um controlador automático para pilotagem de embarcações baseado em um algoritmo conhecido como “três-termos”, ou “Proporcional + Integral + Derivativo”, o *Proportional Integral Derivative* (PID). Minorsky demonstrou como a estabilidade de uma embarcação poderia ser determinada a partir de equações diferenciais que descrevem o sistema (Bennett, 1984).

O controlador automático PID de Nicolas Minorsky, originalmente baseado em um sistema físico de massa-mola, serviu de base para o desenvolvimento de sistemas elétricos análogos que evoluíram para os sistemas de controle industriais modernos.

A grande maioria dos sistemas de controle industriais opera com controladores de ordem fixa do tipo *Proportional Integral* (PI) e PID (Anstron e Hagglund, 2006). Esse tipo de controlador oferece uma solução relativamente simples e muito eficiente atendendo a uma gama de problemas de controle do mundo real. Sendo por isso, uma ferramenta valiosa a serviço da engenharia de sistemas de controle.

O estudo e o desenvolvimento das técnicas de controle podem ser realizados por meio de simulações, onde se tem um melhor controle do ambiente e das variáveis, ou por meio de um protótipo que emule as condições físicas reais do sistema. Desta forma, é constante o desenvolvimento de protótipos representando problemas clássicos de controle. O sistema massa-mola-amortecedor utilizado por Nicolas Minorsky é um exemplo deste tipo de

equipamento, onde o seu uso e aperfeiçoamento foi foco de trabalhos como o de Melo (2005) e Garbin (2018). O sistema demonstra fisicamente a interação dos 3 componentes, onde é possível alterá-los e analisar a resposta a diferentes tipos de entrada.

Outro dispositivo frequentemente utilizado é o sistema de levitação magnética (Silva, 2015; Melo, 2005). O objetivo deste sistema é permitir a levitação estável de um rotor através da interação entre campos magnéticos gerados pelos ímãs do dispositivo. A interação entre os diversos campos gera a quase totalidade da força de sustentação da peça, sendo necessário uma pequena força gerada e controlada por eletroímãs para manter a suspensão magnética de uma bola ou peça.

O sistema de pêndulo invertido também não é incomum no campo de controle, visto que é um problema clássico de sistema físico instável (Huguenin, 2014). O pêndulo invertido é instável, pois pode cair a qualquer instante e para qualquer direção, a menos que uma força adequada de controle seja aplicada a ele (Ogata, 2011; Biazetto, 2017). A dinâmica do sistema é não linear, necessitando de uma linearização ou de abordagens de controle não linear.

É extensa a quantidade de dispositivos para estudo e aprimoramento de técnicas de controle. Dentre esta diversidade, o sistema conhecido como *Ball and Plate* (Bola e Placa) é um dos mais completos para estudo de controle. Neste sistema, uma esfera tem o seu movimento constantemente monitorado por um sensor e controlado por meio de servo motores que ajustam a inclinação da placa sobre a qual ela está deslizando. Por meio desse sistema de controle dinâmico e de sua modelagem matemática, é possível testar algoritmos de seguimento de trajetória, estabilidade, controle PID e algoritmos de controle não linear (MORALES, 2017).

1.1 TEMA DO TRABALHO

O trabalho contempla a modelagem, simulação e implementação de um dispositivo *Ball and Plate* para aplicação de um controlador do tipo PID, tendo como elemento sensor uma tela sensível ao toque.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Imaginemos um sistema mecânico que consista em uma ferramenta didática voltada ao aprendizado, teste, avaliação e demonstração de algoritmos de controle aplicados à sistemas mecânicos do mundo real. Um sistema capaz de responder a eventos externos que representem distúrbios aleatórios em sistemas reais tais como a turbulência sobre um avião em sua rota e uma grande onda incidindo em um navio em alto-mar.

Consideremos nesse contexto, o problema de controlar a posição de uma esfera livre para rolar sobre uma superfície plana inclinável em dois eixos, configurando o assim chamado sistema *Ball and Plate*, ou simplesmente bola e placa. Uma vez que a esfera está sujeita à ações de forças externas, incluindo a força gravitacional, se o sistema não reagir de forma adequada a bola rolará e cairá pela extremidade da placa.

Logo, é necessário que sua posição seja constantemente monitorada e que ações de controle providencialmente determinadas pelo sistema recaiam sobre a placa no sentido de reconduzir a bola de volta à posição pré-estabelecida mantendo-a em equilíbrio.

Tal sistema sugere a presença de um sensor que forneça a localização exata da bola. Além disso, deve determinar sua reação diante de uma eventual situação de desequilíbrio mecânico. Deve ainda, delegar funções de comando a atuadores servo-mecânicos sobre a planta do sistema no intuito de corrigir o desequilíbrio.

Por fim, para agregar interatividade e flexibilidade, o sistema precisa ser portador de uma interface homem-máquina, ampliando assim as possibilidades de aplicações que simulem situações reais.

O projeto do sistema *Ball and Plate* pode ser realizado de diversas formas e com diferentes tecnologias, como revisado no trabalho de Ali (2015), onde a tecnologia do sistema pode variar em três áreas:

- Mecanismo de detecção da esfera: pode ser realizado por visão computacional com uma ou duas câmeras, grades de sensores infravermelhos, por tela sensível ao toque resistiva ou capacitiva ou ainda, por meio do uso de foto transistores.
- Mecanismo de atuação: há protótipos que utilizam motores DC com mecanismo de polias, com uso de servo motores, de atuadores lineares ou de braços robóticos.
- Mecanismo de controle: o controle pode ser realizado em um microcontrolador, por comunicação com Matlab/Simulink, pelo uso de sistemas embarcados ou com uso de mais de um tipo de unidade de processamento.

Há na literatura diversas técnicas de detecção e rastreamento de objetos. No caso específico do sistema bola e placa, as mais comuns são: A técnica de visão computacional utilizando aquisição de imagens por câmera de vídeo, onde aplica-se um algoritmo de rastreamento com base na cor da bola, a exemplo do sistema desenvolvido por (Morales et al, 2017). E a técnica de detecção por meio de tela resistiva sensível ao toque, onde a posição da esfera é determinada pela pressão que seu peso exerce sobre a superfície da tela conforme sistema de (Ham e Taufiq, 2015).

Ao utilizar um dispositivo de visão computacional, surgem alguns problemas inerentes a captura de imagem como a iluminação do ambiente, reflexos, sombras e a relação na aquisição de imagens em frames por segundo (fps) com a velocidade de deslizamento da esfera que impõem uma limitação na velocidade e tempo de resposta do sistema. A utilização de uma tela resistiva sensível ao invés do sistema de visão computacional, tem o potencial de reduzir estas limitações, no entanto, a sua utilização junto a um sistema embarcado não é um problema trivial.

Este estudo propõe uma solução eficaz da problemática sob o ponto de vista do autor

1.3 HIPÓTESES

É considerada a hipótese de que o método de detecção e controle da bola por meio de *touchscreen* é mais preciso, mais simples e mais fiel no registro do deslocamento da esfera. E que por consequência, avalia-se que o desempenho do sistema de controle seja mais estável e com uma melhor resposta a perturbações quando comparado com o sistema utilizando visão computacional.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivos Gerais

Estudo, modelagem e simulação por computador do comportamento dinâmico de um sistema de bola e placa para controle do movimento de uma esfera sobre uma superfície sensível ao toque utilizando um controlador do tipo PID, permitindo a intervenção do usuário por meio de uma interface gráfica amigável. Além disso, construir-se um protótipo que atue como plataforma didática voltada para a aprendizagem de sistemas de controle dinâmicos.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para elaboração do protótipo funcional do sistema *Ball and Plate* cumpriu-se uma série de etapas de desenvolvimento do projeto e de avaliação das ferramentas adotadas como solução.

Objetivo Específico 1: Estudo das diferentes soluções de sistemas Ball and Plate

Dentre estes passos, o primeiro realizado foi o estudo sobre as diferentes formas de implementação do sistema, avaliando quais os pontos que podem ser melhorados entre as versões já desenvolvidas, para desenvolver uma versão atualizada do sistema.

Objetivo Específico 2: Construção de um protótipo funcional sob condições controladas

O segundo objetivo específico deste trabalho foi implementar o sistema *Ball and Plate* com a tela sensível ao toque, atuado por servo motores e controlado por um sistema embarcado baseado em Arduino.

Objetivo Específico 3: Comparar o novo sistema com a primeira versão do Ball and Plate

O terceiro objetivo específico é utilizar os dados adquiridos no novo sistema e comparar com a versão do *Ball and Plate* por visão computacional, analisando a diferença de desempenho entre os sistemas e detalhando os ganhos obtidos.

1.5 JUSTIFICATIVAS

Os dispositivos para ensino de controle, como destacado em Melo (2005) para sistema massa-mola-amortecedor e o sistema de levitação magnética, podem ajudar os alunos na fixação de conceitos teóricos de sistemas de controle, como o uso de técnicas de controle como processamento de sinais e uso de controladores digitais.

Esta conclusão é semelhante ao mencionado em Huguenin (2014) para o sistema de pêndulo invertido, onde menciona o seu uso para testes de estratégias de controle tradicionais (PID), de redes neurais, de lógica fuzzy, dentre outros numerosos estudos.

O sistema *Ball and Plate* como ferramenta de aplicação prática aliada ao estudo da teoria de controle de sistemas mecânicos, demonstra de forma clara, didática e inequívoca o valor dos mecanismos de automação e controle em sistemas de grande escala, como o que possibilitou a chegada do homem à Lua e os diversos mecanismos que nos cercam.

Tal sistema oferece simplicidade, baixo custo, segurança e notável desempenho, configurando-se como plataforma auxiliar de aprendizagem da teoria de controle de sistemas dinâmicos. Pode ainda atender às finalidades de teste, avaliação e demonstração de algoritmos que controlam sistemas reais, com o atrativo de poder ser operado, estudado e modificado nos ambientes amigáveis dos laboratórios de ensino.

Utiliza controladores do tipo PID, que se destacam dentre os métodos de controle pela precisão, bom desempenho e relativa simplicidade, assumindo importantíssimo papel no

contexto da engenharia de sistemas de controle, seja em processos industriais, aplicações militares.

O desenvolvimento deste tipo de equipamento não é trivial e é impulsionado por diversos estudos, como o trabalho de Kassem (2015), onde foi desenvolvido uma plataforma Stewart com 6 graus de liberdade com uma tela sensível ao toque e utilizado para comparar técnicas de PID tradicional, regulador linear quadrático (LQR), controle por janelas deslizantes e controle Fuzzy.

As diferentes soluções de implementação foram estudadas em Ali (2015), onde demonstra-se que não só há estudos atuais no desenvolvimento destas plataformas, como se buscam diferente soluções, seja na atuação da placa, no sistema de controle ou no sistema de sensoramento da esfera deslizante.

O dimensionamento e o correto funcionamento do sistema são deveras importantes para um futuro uso em pesquisas de ponta na área de controle. Um exemplo, é o trabalho de Das (2016), que utiliza este tipo de sistema para comparação entre técnicas avançadas de controle não linear, ao comparar uma técnica de janela deslizante tradicional (SMC) à uma técnica de janela deslizante de ordem fracionária (FOSMC). De forma similar, o trabalho de Morales (2017) utiliza janelas deslizantes com o diferencial de uma modelagem simplificada aliada a um PID como superfície de deslizamento.

Além das técnicas de controle o sistema *Ball and Plate* também pode ser utilizado para estudo e pesquisa de melhores modelagens, como o trabalho realizado por Dusek (2017), onde é proposto a modelagem completa do sistema, incluindo os motores de atuação da placa.

Trabalhos recentes também abordam o aspecto construtivo do dispositivo, ao promover um melhor desenvolvimento dos circuitos que dão apoio a placa e ao monitoramento da esfera, como o trabalho de Mujadin (2017).

Todos estes trabalhos demonstram a importância deste tipo de dispositivo para ensino e pesquisa, onde é possível abordar técnicas clássicas como PID e linearização, como técnicas avançadas de controle não linear, modelagem e até de eletrônica, instrumentação, microcontrolador e sistemas embarcados.

1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Até aqui nos limitamos ao delineamento do problema e apontamos as razões e motivações pelas quais estamos interessados na sua solução, além de estabelecermos os objetivos pretendidos. No Capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica necessária para

a abordagem do problema focalizando as características e mecanismos dos diversos subsistemas componentes da plataforma, sendo complementado pela modelagem matemática do sistema apresentado no Capítulo 3. O Capítulo 4 trata dos materiais empregados e metodologia aplicada no processo de desenvolvimento e o Capítulo 5 o desenvolvimento propriamente dito. O Capítulo 6 são discutidos resultados, sendo o trabalho finalizado no Capítulo 7 pela conclusão e considerações finais.

CAPÍTULO 2

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para um melhor entendimento dos aspectos específicos sistema *Ball and Plate*. Além da teoria aplicada a sistemas de controle de um modo geral, será apresentada a modelagem matemática do sistema em questão bem como a sua simulação em software. A modelagem e simulação tem grande valia no estudo do comportamento dinâmico e estático do sistema tendo em vista a implementação de um protótipo funcional.

2.1 SISTEMAS DE CONTROLE

No cotidiano do mundo moderno o homem desenvolve atividades que requerem cada vez mais o auxílio de dispositivos elétricos, eletrônicos e eletromecânicos que acompanham suas tarefas, seja no ambiente doméstico, no comércio, na indústria, nos transportes, de uma forma ou de outra eles estão presentes. Como exemplo podemos citar o controle de temperatura doméstico, o controle de velocidade dos veículos, as modernas aeronaves comerciais que decolam e pousam sem intervenção humana, os robôs que cortam, dobram e soldam chassis de automóveis na indústria com incrível precisão. Em todos esses ambientes parece haver uma inteligência capaz de decidir por si mesma, mas na realidade eles fazem uso de sistemas de controle. Golnaraghi e Kuo, (2012) destacam que “praticamente, todos os aspectos da nossa vida diária são afetados por algum tipo de sistema de controle”.

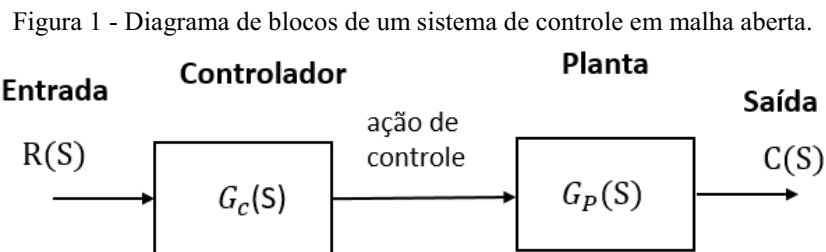
A literatura, de uma forma geral, descreve um sistema de controle como sendo dotado de uma ou mais entradas, um controlador associado a um processo ou planta e uma ou mais saídas, podendo estar em malha aberta ou malha fechada. De acordo com Ogata (2011), “um controlador pode ser definido como um dispositivo que usa o sinal de erro para determinar ou calcular o sinal de controle a ser aplicado à planta”.

O objetivo de um controlador em um sistema de controle é conduzir a planta à uma condição de equilíbrio em regime permanente em um ponto alvo pré-estabelecido comumente chamado de *set point*. Para isso, ele manipula a relação entre os sinais de saída e entrada do sistema atuando sobre seus parâmetros a fim de atingir especificações de desempenho.

2.1.1 Sistemas de controle em malha aberta

Os sistemas de controle em malha aberta são aqueles onde o sinal de saída não exerce nenhuma ação no sinal de controle do sistema, ou seja, sua saída não é medida nem realimentada para comparação com a entrada (Ogata, 2011). Nesses sistemas um sinal de controle é aplicado à entrada do processo e espera-se que depois de certo tempo a variável controlada assuma o valor desejado. Um sistema em malha aberta é sensível a perturbações externas, e seus efeitos são propagados para a saída. Em sistemas de controle, um sinal de perturbação é um sinal de entrada indesejado que afeta a saída do sistema (Dorf, 2013). São simples de construir e menos dispendiosos que um sistema correspondente em malha fechada.

A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos de um típico sistema em malha aberta.



Fonte: Própria (2018)

A função de transferência para o sistema da Figura 1 é dada por

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G_c(s)G_p(s) \quad (2.1)$$

2.1.2 Sistemas de controle em malha fechada (realimentação)

Frequentemente é necessário a introdução de um elo de realimentação para melhorar a especificação de desempenho de um sistema de controle.

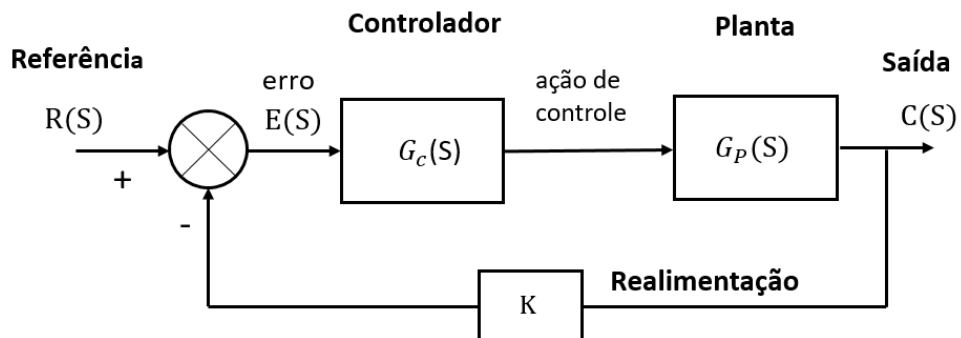
Um sistema que estabeleça uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle, é denominado sistema de controle com realimentação (Ogata, 2011). Esses sistemas também são conhecidos como sistemas de malha fechada.

A Figura 2 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada, onde o sinal de erro atuante $E(s)$, que é a diferença entre o sinal de entrada $R(s)$ e o sinal de realimentação $KC(s)$, é reaplicado na entrada do controlador de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado. Em outras palavras, as informações sobre como o

sistema está evoluindo são utilizadas para determinar o sinal de controle a ser aplicado na entrada.

Esse tipo de controlador ao ser afetado por perturbações externas, ajusta o sinal de entrada através da realimentação de um sinal a ser somado (realimentação positiva) ou subtraído (realimentação negativa). Assim, um sinal de erro é continuamente reinserido na planta de modo que a comparação contínua entre o valor atual de saída e o set point conduza uma correção que produz uma convergência de um valor a outro. (Penedo, 2014)

Figura 2 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.



Fonte: Própria (2018)

A função de transferência do sistema da Figura 2 é dada por

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + kG_c(s)G_p(s)} \quad (2.2)$$

Conforme mostra o diagrama, o sinal na saída da planta é comparado com um sinal de referência e o desvio $E(s)$ entre os dois sinais é reutilizado pelo controlador.

Um dos custos da adição de um elo de realimentação é a introdução da possibilidade de instabilidade. Enquanto o sistema em malha aberta é estável, o sistema em malha fechada pode não ser sempre estável (Dorf, 2013).

As principais vantagens de um sistema de controle em malha fechada são :

- Resposta relativamente insensível à distúrbios ou perturbações externas;
- Pouca sensibilidade à variações dos parâmetros do processo, tornando o sistema mais robusto;
- Melhor redução do erro em regime permanente.

2.1.3 Estabilidade de um sistema de controle

Do ponto de vista prático, um sistema de controle que não alcança estabilidade não tem utilidade, salvo em raras exceções. A condição de estabilidade é uma das características mais desejadas, devendo assim ser assegurada pelo projetista. Em sistemas de controle pode ser

classificada como estabilidade absoluta ou relativa. A estabilidade absoluta considera apenas se o sistema é estável ou instável, ou seja, se o processo evolui para o regime permanente ou não. Há ainda uma abordagem que pode ser aplicada a um sistema considerado estável, onde é feito um estudo sobre o grau de estabilidade, ou a medida da estabilidade relativa, e não está no escopo desse trabalho. Assim, a expressão estabilidade nesse contexto expressa estabilidade absoluta.

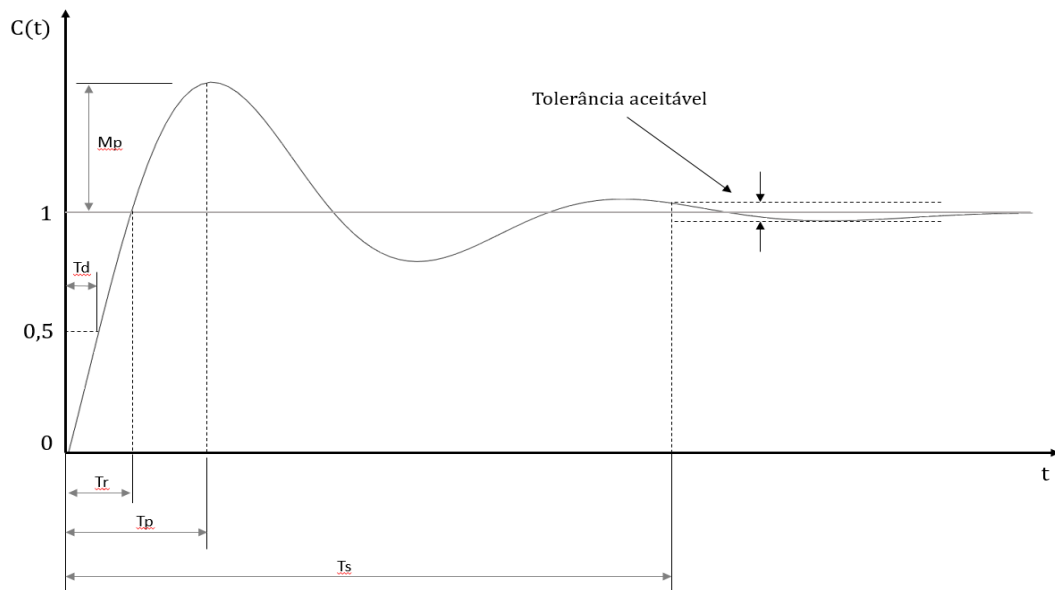
De acordo com (Ogata, 2011), um sistema linear invariante no tempo é estável se a saída sempre retorna ao estado de equilíbrio quando é submetido a uma condição inicial, como um degrau unitário, e é instável se a saída diverge sem limites partindo do estado de equilíbrio diante de dada condição inicial. Dorf (2013) define um sistema de controle estável como um sistema dinâmico com uma resposta limitada para uma entrada limitada.

Para atingir a estabilidade, o projetista pode adotar uma estratégia de controle em particular de maneira a privilegiar dada característica desejável. Pode optar, por exemplo, que o sistema tenha um tempo de subida e de acomodação menor, convergindo assim mais rapidamente para a estabilidade, ou tenha respostas mais lentas com movimentos mais suaves durante o regime transitório. Penedo (2014), lembra que “um sistema pode até admitir, sobre certas condições, um comportamento oscilatório, mas deve convergir para o ponto de ajuste depois de certo intervalo de tempo considerado aceitável”.

Portanto, o problema se concentra em estabelecer uma maneira de se ajustar o sistema físico visando atender às especificações de desempenho desejadas. Uma vez que a planta do sistema permanece inalterada, cabe ao desenvolvedor projetar controladores que possibilitem que o sistema atinja requisitos e resultados compatíveis às necessidade do projeto.

O comportamento dinâmico de um sistema de controle pode ser previsto à partir dos seus componentes (Ogata, 2011). De fato, cada sistema tem suas próprias peculiaridades e podem responder de formas diversas a entradas particulares. Algumas variáveis, porém, são comuns a todos esses sistemas sendo úteis no processo de desenvolvimento, análise e ajuste da resposta transitória e permanente. A Figura 3 ilustra a resposta à um degrau unitário com suas especificações mais comuns.

Figura 3 - Resposta a um degrau unitário e seus parâmetros.



Fonte: Própria (2018)

Os parâmetros de resposta são descritos como:

- Tempo de atraso, t_d : É o tempo necessário para a resposta atingir 50% do seu valor final pela primeira vez.
- Tempo de subida, t_r : Tempo necessário para que a resposta atinja 100% do seu valor final
- Tempo de pico, T_p : É o tempo para que a resposta atinja o primeiro pico de sobressinal
- Máximo sobressinal, M_p : É o valor máximo de pico da curva de resposta medido à partir
- Tempo de acomodação ou tempo de assentamento, T_s : É o tempo necessário para a curva de resposta alcançar e permanecer dentro de uma faixa de tolerável de valores em torno do valor final.

2.1.4 Comportamento dinâmico

Uma forma de avaliar o comportamento dinâmico de um sistema de controle é através da análise da sua função de transferência. A função de transferência $H(s)$ de um sistema de segunda ordem é equivalente à transformada de Laplace da resposta ao impulso $h(t)$ do sistema, e tem a forma padrão expressa por

$$H(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.3)$$

em que ω_n é a frequência natural de oscilação não amortecida e ζ é o coeficiente de amortecimento do sistema.

As raízes do polinômio característico do denominador da equação são os valores de s que tornam a função de transferência infinita, e são chamadas de polos da função (Nise, 2012). Uma forma bastante usual de se determinar o comportamento dinâmico do sistema consiste na análise dos polos. O conhecimento da localização dos polos fornece informações valiosas sobre como o sistema responderá à uma dada entrada. Os polos são números complexos que podem ou não ter as partes real e/ou imaginária, que por sua vez podem ser positiva ou negativa. Sua análise é de grande importância para o conhecimento da natureza da resposta do sistema.

O quadro 1 apresenta as características de resposta de um sistema dinâmico em função da localização dos polos complexos:

Quadro 1 - Características da resposta em função da localização dos polos.

Parte real	Parte imaginária	Característica da resposta
Negativa	Nula	Converge, não oscila
Negativa	Existe	Converge, oscila
Positiva ou nula	Nula	Diverge, não oscila
Positiva	Existe	Diverge, oscila

Fonte: Adaptado de Penedo (2014)

O comportamento dinâmico do sistema para uma dada entrada pode ser descrito em termos do coeficiente de amortecimento ζ , e da frequência natural de oscilação, ω_n .

De acordo com (Ogata, 2011), um sistema dinâmico de segunda ordem terá um comportamento conforme descrito à seguir:

Se $0 < \zeta < 1$, os polos de malha fechada são complexos conjugados e se situam no semiplano esquerdo do plano complexo s , nesse caso o sistema é denominado subamortecido e a resposta transitória é oscilatória. Sistemas com baixo coeficiente de amortecimento, como $\zeta < 0,4$, apresentam respostas rápidas, porém, resultam em excessivo sobressinal no regime transitório. Por outro lado, sistema com alto amortecimento, com $\zeta > 0,8$, apresentam respostas lentas.

Se $\zeta = 0$, o sistema terá uma resposta transitória que não decai.

Se $\zeta = 1$, o sistema é chamado criticamente amortecido.

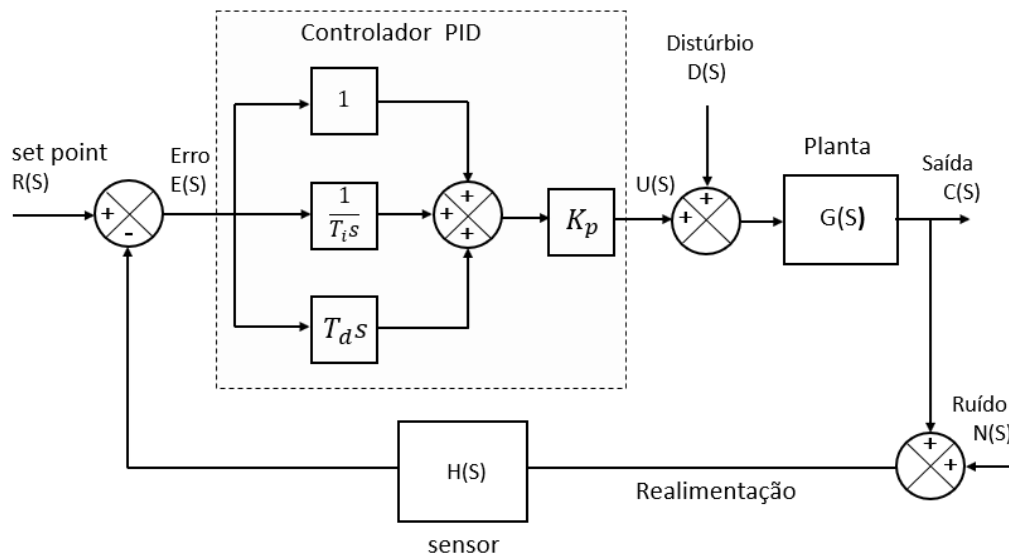
Se $\zeta > 1$, o sistema é chamado superamortecido.

2.2 O CONTROLADOR PID

A estabilidade e precisão são características essenciais em projetos de sistemas de controle. Ao longo do tempo a engenharia desenvolveu diversas técnicas de controle visando atender às necessidades sempre crescentes do homem moderno, o que possibilitou a desenvolvimento de sistemas avançados.

Com sua relevância histórica e desempenhando importantíssimo papel nos sistemas de controles atuais, o PID está presente na maior parte dos sistemas de controle industriais. É um método de controle em malha fechada cuja saída é composta pela soma das contribuições de três ações distintas: proporcional, integral e derivativa, daí o nome três termos. A ideia é valer-se das características particulares de cada ação de controle a fim de que o sistema assuma um comportamento dinâmico satisfatório tanto em regime transitório como em permanente. A figura 4 apresenta um sistema com controlador PID exposto à distúrbio e ruído.

Figura 4 - Sistema com controle PID na presença de distúrbio e ruído



Fonte: Adaptado de Ogata (2018)

As equações (2.4) e (2.5) descrevem matematicamente o controlador PID no domínio do tempo e da frequência, respectivamente:

$$u(t) = K_c \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.4)$$

$$U(s) = \frac{(K_p s + K_i + K_d s^2) E(s)}{s} \quad (2.5)$$

Tradicionalmente os parâmetros de ajuste do PID são expressos da seguinte forma:

$$K_c = K_p : \text{Ganho proporcional};$$

$$\frac{K_c}{T_i} : \text{Ganho integral};$$

$$K_c T_d : \text{Ganho derivativo}.$$

O quadro 2 apresenta as principais características das ações de controle do PID quando do aumento das constantes K_p , K_i e K_d .

Quadro 2 - Principais características das ações do PID.

Ganho	Tempo de subida (T_r)	Máximo sobressinal (T_r)	Tempo de estabilização (T_r)	Erro de regime Permanente (T_r)
K_p	diminui	aumenta	Pequena alteração	diminui
K_i	diminui	aumenta	diminui	elimina
K_d	Pequena alteração	diminui	aumenta	Pequena alteração

Fonte: Adaptado de Penedo (2014)

2.2.1 Ação de controle proporcional

Quando o sinal de controle realimentado é linearmente proporcional ao erro do sistema, chamamos o resultado de realimentação proporcional (Franklin et al, 2013).

Sua amplitude é proporcional ao erro instantâneo, ou seja, à diferença entre a posição atual e a posição de referência, seu valor alvo. Quanto mais longe da estabilidade, mais intensa será a resposta proporcional. A saída do controle proporcional está relacionada à sua entrada por meio de uma constante de proporcionalidade K_p , que é o ganho proporcional, logo, o controlador proporcional é essencialmente um amplificador de ganho ajustável (Ogata, 2011). Quanto maior o valor da constante K_p , menor o erro em regime permanente, porém, o comportamento do sistema tende a ficar mais oscilatório. O aumento excessivo de K_p pode levar o sistema à instabilidade.

A ação de controle proporcional é descrita pela equação

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.6)$$

em que K é o ganho proporcional e $e(t)$ o erro instantâneo atuante no instante t .

2.2.2 Ação de controle integral

O controle integral produz um sinal que é proporcional à integral no tempo do desvio entre a referência e a posição corrente do sistema. Atua integrando (somando) os erros instantâneos multiplicados pela constante integral K_i , fazendo com o processo avance em

direção ao ponto alvo eliminando o erro residual. Sua principal função é fazer com que o processo siga um sinal de referência do tipo degrau com erro nulo em regime permanente, rejeitando, portanto, perturbações constantes. De acordo com Nise (2012), “a resposta em regime permanente determina a exatidão do sistema de controle; ela determina quão de perto a saída se aproxima da resposta desejada”. Segue a expressão da ação integral:

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int e(t) dt \quad (2.7)$$

em que T_I é o tempo integral.

2.2.3 Ação de controle derivativo

A ação de controle derivativo gera em sua saída uma resposta proporcional à derivada do erro. Dessa forma, quanto maior a taxa de variação do erro, maior será a amplitude da resposta, o que resulta em maior estabilidade e menor tempo de estabilização do sistema. Franklin (2013) destaca que “um efeito importante do termo derivativo é a suavização da resposta devido a sinais instantâneos”.

O controle derivativo fornece uma ação antecipatória, preditiva, com respostas a variações rápidas, sendo particularmente importante durante o regime transitório. Dorf (2013) defende que “uma das características mais importante dos sistemas de controle é sua resposta transitória”. Nise (2012) justifica ao dizer que “a resposta transitória é importante porque afeta a velocidade do sistema e influencia a paciência e o conforto dos seres humanos; ela determina quão de perto a saída se aproxima da resposta desejada”

O controle derivativo responde de acordo com a equação

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

em que T_d é o tempo derivativo.

2.3 SINTONIA

A bibliografia da teoria de controle indica diversas técnicas para sintonia dos parâmetros do PID, tanto por meio da malha aberta quanto em malha fechada. Métodos clássicos como Ziegler & Nichols e Cohen-Coon, por exemplo, são métodos clássicos baseados na resposta do sistema ao degrau. Outra abordagem para o problema de sintonia é a simples proposta de regras empíricas que permitem ajustar os parâmetros do PID sem conhecimento do modelo matemático da planta. Tais regras fornecem estimativas dos valores dos parâmetros do

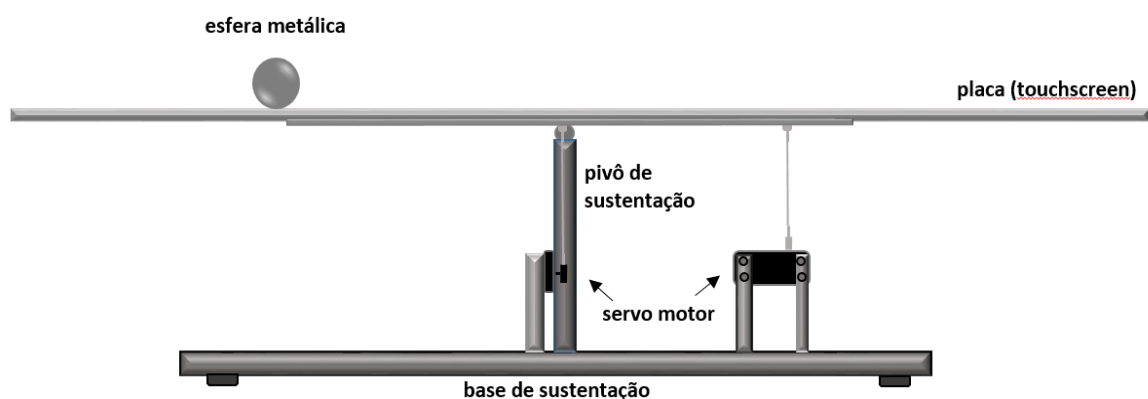
controlador e proporcionam um ponto de partida para uma sintonia mais fina, caso necessária. Alternativas mais atuais lidam com a sintonia do PID utilizando técnicas de controle adaptativo, lógica nebulosa, otimização, dentre outras técnicas mais avançadas. Dito isso, foge ao objetivo e escopo deste trabalho determinar a melhor sintonia para o sistema, sendo utilizada apenas uma sintonia empírica que garanta um correto funcionamento do sistema.

2.4 O SISTEMA *BALL AND PLATE*

O *Ball and Plate* é um sistema mecânico composto basicamente de uma esfera que rola livremente sobre uma placa plana inclinável em dois eixos. Possui um sistema de controle que tem como objetivo manter a esfera em equilíbrio em uma posição predeterminada sobre a placa, podendo ser um ponto fixo ou ainda um lugar geométrico, a exemplo de um quadrado imaginário, uma circunferência ou outra figura que possa ser expressa através de uma equação matemática.

Em sua forma elementar, o *Ball and Plate* é um sistema em malha aberta instável (Ham e Taufiq, 2015). Para a estabilização da posição da bola segundo uma posição pré-definida, faz-se necessário a inclusão de um sistema que constantemente monitore as coordenadas de posição da bola e ajuste a inclinação da placa de tal forma que o movimento possa ser controlado. Quando a bola tende a se afastar do limite pré-definido um sensor disponibiliza essa informação ao controlador que determina as ações necessárias para reconduzir a bola para a posição designada. A Figura 5 mostra o aspecto geral do sistema.

Figura 5 - Sistema *Ball and Plate*.



Fonte: Própria(2018)

No contexto do sistema *Ball and Plate* entendemos como entrada a inclinação imposta à placa através de atuadores servo-mecânicos, enquanto a saída é caracterizada pela posição $p(x,y)$ da esfera em relação ao placa.

Para cumprir essa tarefa, o sensor, o controlador e os atuadores devem trabalhar de forma coordenada e simultânea em um sistema realimentado de malha fechada.

De posse das coordenadas de posição, um sistema de controle deverá determina as ações de controle necessárias para estabelecer o equilíbrio da bola. O resultado dos cálculos, disponibilizado pelo controlador, é enviado ao sistema de atuadores que modificam a inclinação da placa na tentativa de manter o sistema em equilíbrio.

Os atuadores são servomecanismos conectados à placa por meio de braços mecânicos, os chamados de links. São capazes de inclinar a placa em qualquer direção tendo como ponto central de apoio um mecanismo de pivô articulado. A articulação no topo do pivô permite o livre movimento de inclinação da placa, que irá impor alterações no movimento natural da bola.

Esse movimento é então detectado pelo mecanismo sensor que alimenta o controlador. O ciclo então se reinicia caracterizando assim um sistema realimentado em malhada fechada, onde o algoritmo constantemente recebe informações de como o sinal está evoluindo e determina a ação de controle necessária para a estabilização da bola segundo uma referência pré-estabelecida, os chamados *set points*.

2.4.1 O sistema *Ball and Plate* com detecção por visão computacional

O sensoriamento é uma das etapas mais importantes do sistema *Ball and Plate*, sendo também uma das mais críticas. Uma vez que os cálculos executados pelo controlador são baseados nas informações entregues pelo sistema de detecção e rastreamento, o êxito do sistema de controle está condicionado à um bom sistema de sensoriamento. Os métodos mais empregados em sistemas *Ball and Plate* são o de monitoramento por tela sensível ao toque e o método por câmera de vídeo.

O sistema baseado em câmera de vídeo opera através de uma biblioteca de software de visão computacional (*computer vision*). A detecção por esse método é baseada na aplicação de filtros que isolam a área de interesse na imagem utilizando uma característica distinta como a cor do objeto, nesse caso, a esfera. É necessário que haja contraste de cor suficiente entre o objeto e a placa de forma que os dois possam ser desassociados. Uma desvantagem desse método é que a taxa de amostragem da posição da esfera fica condicionada à taxa de captura da câmera, que tipicamente é de 30 frames por segundo (30FPS). A utilização da câmera de vídeo

constitui uma solução mais complexa, no entanto mais versátil e com menor custo que a solução com tela de toque (Castro, 2016).

Figura 6 - Sistema *Ball and Plate* com detecção por câmera de vídeo.

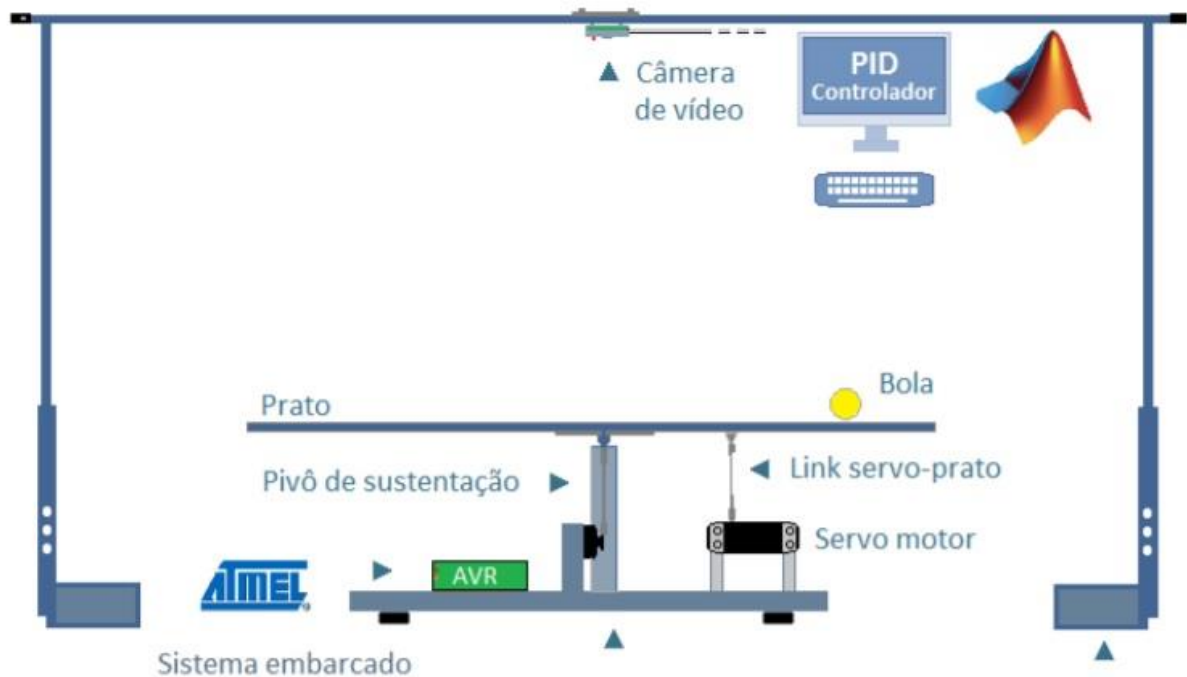


Fonte: Própria(2017)

A Figura 6 mostra a implementação de um *Ball and Plate* utilizando sensoriamento por câmera de vídeo. O sistema foi objeto de nossa atenção e estudos em trabalho anterior. A detecção por visão computacional monitora continuamente o conjunto bola e placa através de uma câmera de vídeo USB que captura imagens à uma taxa de 30 frames por segundo (30 FPS) e as envia para um computador que executa o processamento de detecção e rastreamento através de uma biblioteca de visão computacional e software MATLAB. As coordenadas de posição da bola são então entregues à um controlador do tipo PID que determina as ações de controle necessárias para o equilíbrio da bola. As informações são então enviadas à um microcontrolador ATMEGA328 que através de pulsos PWM movem dois servo motores que estão mecanicamente conectados à placa através de links mecânicos. O sistema constituído pela placa, servos e pivô e unidade microcontrolada está fixado sobre uma base maciça construída de alumínio. Um suporte ajustável afixa a câmera de vídeo em posição estrategicamente determinada para capturar imagens restritas a área da placa. A Figura 7 apresenta uma visão geral do sistema da Figura 6.

Nos resultados obtidos do sistema mostrado, algumas conclusões são dignas de nota. O monitoramento por câmera de vídeo apresenta um desempenho satisfatório, porém, a amostragem da posição da esfera fica restrita à taxa de captura de quadros da câmera. Isso impõe certa granulidade ao movimento da placa, provocando trepidações desagradáveis.

Figura 7 - Aspecto geral do sistema *Ball and Plate* com detecção por visão computacional.



Fonte: Própria(2017)

Algumas outras características indesejáveis também foram registradas durante o estudo do sistema, dentre eles estão:

- Alta dependência da iluminação ambiente, sendo altamente sensível ao excesso, falta ou variação da luz local;
- Aspecto crítico no enquadramento da área da placa pela câmera;
- Vulnerabilidade à presença de partes como mãos e objetos na área sobre a placa.
- Instabilidades diante de possíveis vibrações na haste de suporte da câmera e/ou base do sistema.

Acreditamos que uma forma mais fiel para a detecção para esse tipo de sistema seja através de tela sensível ao toque, conforme exposição do tópico seguinte.

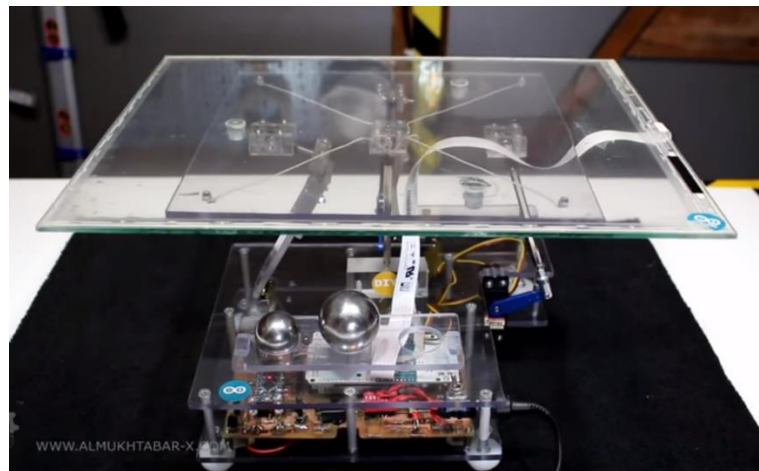
2.4.2 O sistema *Ball and Plate* com detecção por tela sensível ao toque (*touchscreen*)

Um outro método de sensoriamento baseia-se em uma tela sensível ao toque sobre a qual a esfera se desloca. As telas *touchscreen* do tipo resistiva são ativadas através do pressionamento de um dado ponto sobre sua superfície. Esferas de aço como a mostrada no exemplo anterior, com massa acima de 100g, são particularmente adequadas para a detecção sobre *touchscreens*. Elas possuem alto momento de inércia dada a sua massa relativamente elevada, cujo peso é suficiente para ativar o circuito resistivo da tela. As telas sensíveis ao toque serão abordadas em tópico posterior.

Castro (2016) acredita que uma das grandes vantagens do uso de telas sensíveis ao toque em projeto deste tipo é a possibilidade de ter períodos de amostragens menores para o sensoriamento da posição da esfera, se comparadas à câmera de vídeo. De fato, enquanto as câmeras de vídeo oferecem taxa de amostragem restrita à sua capacidade de converter quadros a cada segundo, as telas *touchscreen* têm sua taxa de amostragem em função da distribuição uniforme de resistência ao longo de sua superfície, conforme será visto posteriormente. Desta forma a taxa de amostragem fica condicionada à velocidade de conversão do ADC do microcontrolador utilizado, podendo chegar a centenas de pontos por segundo.

Awtar (2017) considera que “a tela *touchscreen* é uma solução extremamente confiável apresentando erro de menos de 1% com resolução de 1024X1024”. Isso as torna notavelmente úteis em aplicações como o *Ball and Plate*. Além dessa evidente vantagem, as telas *touchscreen* se apresentam insensíveis a variações ou mesmo ausência de iluminação. Não sofrem interferência de vibrações como no sistema por câmera de vídeo, não requerem suportes mecânicos adicionais e dispensam a presença de um computador dotado de sistema operacional.

Figura 8 - *Ball and Plate* com sensoriamento por *touchscreen*.



Fonte: (ALMUKHTABAR-X, 2018)

2.5 TELAS SENSÍVEIS AO TOQUE (*TOUCHSCREEN*)

As telas sensíveis ao toque (*touchscreen*) se tornaram notavelmente populares nos últimos anos, estando presentes em dispositivos como smartphones, tables, notebooks e PDAs. Elas funcionam como interruptores transparentes que permitem que o local tocado seja detectado.

Seu funcionamento baseado em toque é mais próximo do mundo físico, garantindo uma interação homem-máquina (IHM) intuitiva e eficiente onde o usuário pode tocar diretamente na tela as imagens que está vendo. Por esse fato, há expectativa de que suas aplicações se estendam ainda mais com a popularização da tecnologia de internet das coisas (IoT).

Existem diversas tecnologias aplicadas a telas sensíveis ao toque, e cada uma possui um método de detecção exclusivo. Qual tecnologia deve ser escolhida depende da aplicação em questão. As tecnologias mais comuns são a resistiva, a capacitiva, a de infravermelho e a tecnologia de onda acústica de superfície.

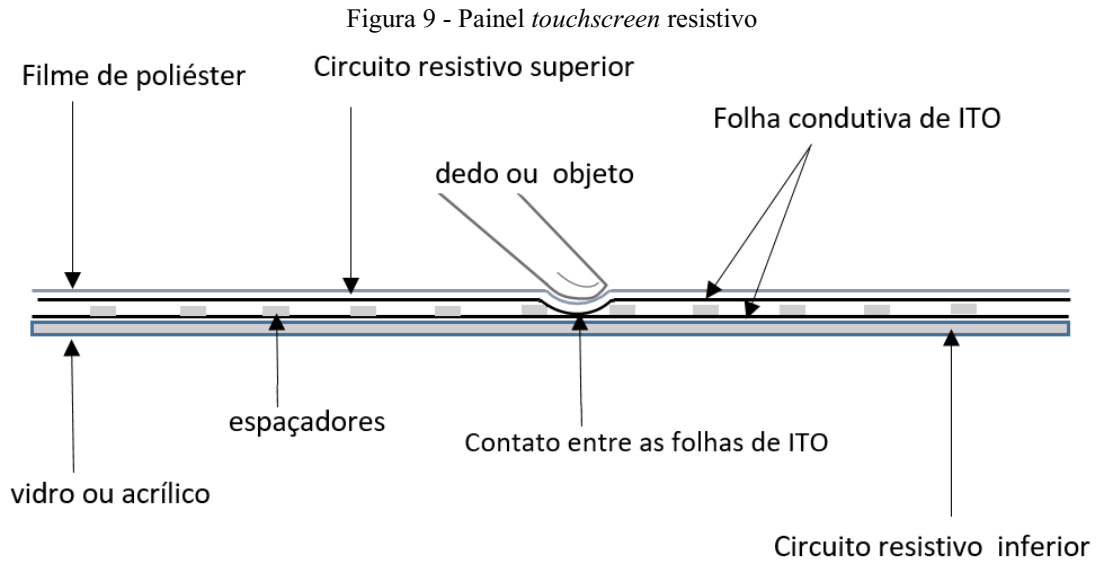
Para este trabalho o interesse está em torno da tecnologia resistiva, as razões serão apresentadas em tópicos posteriores.

2.5.1 Telas sensíveis ao toque resistivas

As telas resistivas são uma das principais tecnologias de *touchscreen*. Sua popularidade se deve principalmente à sua estabilidade e versatilidade. Uma das vantagens das telas resistivas sobre outras tecnologias como a capacitiva, segundo Barley, *Digikey Electronics* (2012) é a insensibilidade na detecção em presença de água e poeira, além da possibilidade de utilizar luvas nas mãos. De fato, um toque se dá apenas por pressão mecânica sobre um ponto da superfície.

De acordo como *Touch Screen Museum* (2018), usualmente um painel resistivo *touchscreen* é constituído por folhas paralelas transparentes, uma na face superior e outra na parte inferior. As folhas são revestidas com uma fina camada de óxido de índio-estanho (ITO) formando uma película. O ITO é um material óxido semiconductor transparente e sua distribuição uniforme em película faz com que esta tenha um valor de resistência uniforme sobre as duas superfícies.

Espaçadores colocados entre as folhas impedem que as películas de ITO entrem em contato entre si a menos que um ponto sobre a superfície seja pressionado. A Figura 9 apresenta os aspectos construtivos de uma tela *touchscreen* resistiva. Quando um objeto, como um dedo, pressiona um ponto sobre a superfície do painel, as duas camadas de ITO são eletricamente conectadas naquele ponto, por onde a corrente flui e o ponto de contato pode então ser detectado. Eletrodos conectam as películas de ITO à um cabo flexível (*flat cable*) que dispõe de um conector em sua extremidade permitindo conexão com um dispositivo externo. Os sinais de tensão de saída podem ser interpretados por um controlador equipado com um conversor analógico-digital (ADC) para determinar a posição de toque. Usualmente a folha superior é um filme de poliéster e a inferior um substrato podendo ser vidro ou acrílico.

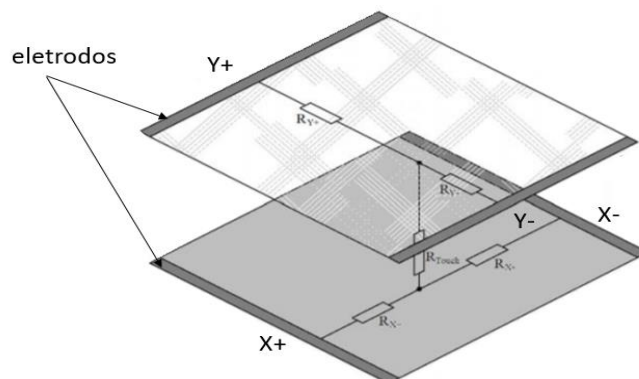


Fonte: Própria(2018)

2.5.1.1 Telas *touchscreen* resistiva de quatro vias

Touchscreens tipicamente são fabricadas com quatro ou cinco vias de comunicação. As telas de quatro vias são mais antigas no mercado e utilizam um par simples de eletrodos em forma de tiras retangulares perpendiculares entre si, sendo cada par conectado à uma camada de ITO que reveste cada uma das placas. Uma placa possui distribuição equipotencial em X, e a outra possui distribuição potencial em Y. As duas placas medem as tensões umas das outras. Os eletrodos são então conectados a cabos flexíveis que permitem comunicação com um dispositivo externo. A Figura 10 mostra os eletrodos e suas conexões para uma tela de 4 vias.

Figura 10 - Aspecto elétrico de *touchscreen* 4 vias.



Fonte: Adaptado de Microchip Technology (2007)

2.4.1.2 Telas *touchscreen* resistivas de cinco vias

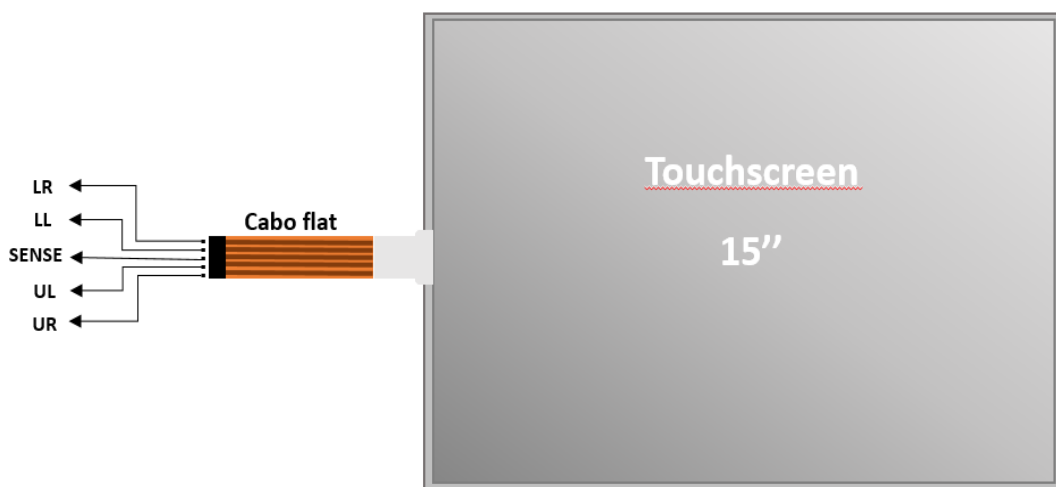
As telas de 5 vias possuem quatro eletrodos circulares conectados por um padrão linear de condução de forma a garantir um gradiente de tensão uniforme aplicado sobre as películas

de ITO. Os eletrodos da placa inferior estabelecem distribuição equipotencial nas direções X e Y. A placa superior não tem eletrodos, logo, não apresenta distribuição equipotencial e não requer precisão na uniformidade de resistência, apenas mede a tensão da placa inferior. Esse fato faz com que as telas de 5 vias sejam menos críticas no seu funcionamento, sendo também mais duráveis uma vez que são relativamente insensíveis a variações na resistência do material da placa superior ao longo dos anos. Os 5 eletrodos de uma *touchscreen* de 5 vias são referidos com:

- UL (Upper Left): Superior esquerdo;
- UR (Upper Right): Superior direito;
- LL (Lower Left): Inferior esquerdo;
- LR (Lower Right): Inferior direito;
- SENSE (Sentido): Sensor.

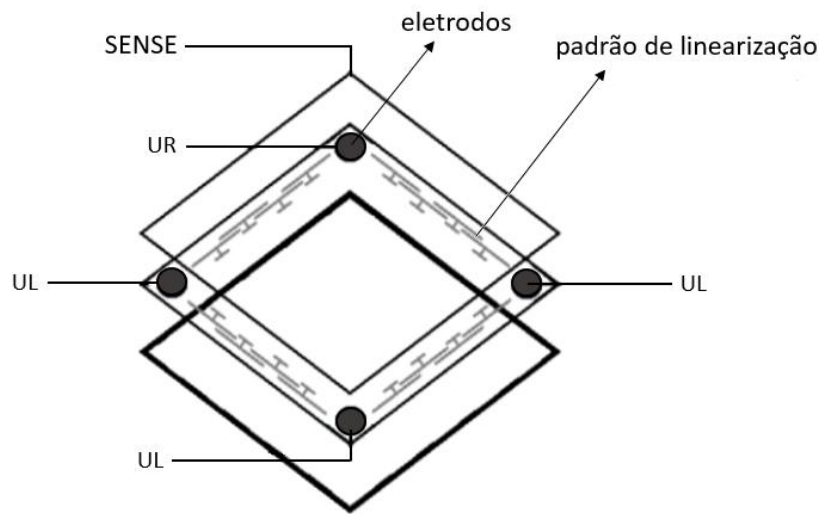
A Figura 11 apresenta o aspecto de uma tela típica *touchscreen* resistiva de 5 vias, juntamente com seu cabo flexível e conector.

Figura 11 - Tela *touchscreen* resistiva de 15'' e suas conexões.



Fonte: Própria(2018)

As primeiras 4 vias são conectadas aos eletrodos UL, UR, LL e LR. A quinta via é conectada ao SENSE, o sensor na placa superior. Ao se aplicar uma tensão a um par de eletrodos na superfície resistiva inferior, um gradiente de potencial uniforme se forma ao longo de toda essa superfície. Um toque em um ponto sobre a superfície estabelece contato entre as duas películas de ITO, sendo possível fazer a leitura através da quinta via. A Figura 12 apresenta a disposição dos eletrodos em uma tela de 5 vias.

Figura 12 - Aspecto elétrico de *touchscreen* 5 vias.

Fonte: Adaptado de Microchip Technology (2007)

2.5.2 Detecção em *touchscreen* de cinco vias e conversão analógico-digital

As telas *touchscreen* são dispositivos analógicos por natureza, estando tipicamente acompanhadas do seu respectivo controlador distribuído pelo fabricante da tela.. Um controlador *touchscreen* é uma pequena placa de computador que faz a conexão entre a tela sensível ao toque e o computador, convertendo as informações de toque do usuário em informações que o computador entende (Krithikaa, 2016). Para que esse interfaceamento seja possível, é necessário converter as variações analógicas de tensão em variações digitais. As grandezas digitais assumem uma quantidade finita de valores no seu domínio, portanto, são mais adequadas para serem processadas por computadores, uma vez que suas memórias são limitadas.

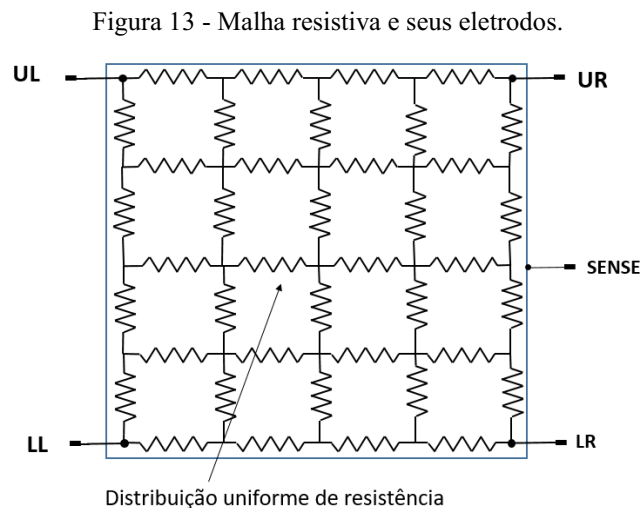
O dispositivo que executa a tarefa de converter um sinal analógico em digital é chamado conversor analógico-digital (ADC). O processo de conversão consiste em amostrar o sinal um número de vezes a cada segundo e associar cada amostra ao valor correspondente à amplitude do sinal naquele instante (Zanco, 2006). Um valor de tensão de referência é comumente requerido no processo de conversão.

Um controlador de *touchscreen* é basicamente um ADC dotado de interruptores que controlam quais eletrodos serão acionados e seus respectivos níveis de tensão, além de controlar quais eletrodos serão usados como entrada para a conversão. (Downs, Texas Instruments, 2005).

Os sistemas operacionais utilizam *drivers*, que são peças de *software* distribuídos pelos fabricantes que permitem que o controlador e o computador falem a mesma linguagem. Pode

ocorrer, entretanto, que os controladores fornecidos não atendam as necessidades de um projeto em particular, como exemplo os projetos utilizando microcontroladores que não suportam um sistema operacional. Nesse caso, há a necessidade de se desenvolver um controlador específico que faça o devido interfaceamento com a aplicação do usuário.

O processo de detecção das coordenadas x e y de um ponto tocado sobre a tela basicamente consiste em estabelecer tensões nos eletrodos de modo a configurar um divisor de tensão cuja saída pode ser lida no terminal SENSE. Uma vez que a distribuição de resistência é uniforme ao longo da superfície, conforme mostra a Figura 13, a cada ponto distinto tocado corresponderá a tensões distintas. Dessa forma o ADC determinará inequivocamente a localização do toque.



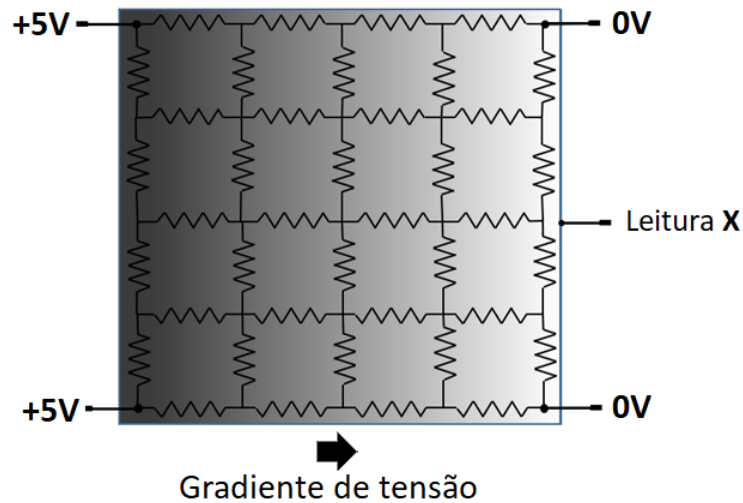
Fonte: Própria (2018)

2.4.2.1 Leitura da tensão no eixo X

A leitura das tensões ao longo do eixo x pode ser feita da seguinte forma:

- Aplica-se 5 volts nos eletrodos UL e LL mantendo os eletrodos UR e LR aterrados, ou seja, em 0 volts. Dessa forma, um gradiente de tensão linearmente distribuído na horizontal será estabelecido. Essa distribuição se mantém equipotencial ou constante para variações na vertical, conforme mostra a Figura 14.
- Procede-se a leitura no terminal SENSE. Se por exemplo um ponto central ao longo da direção x for tocado, 2,5 V serão medidos na saída. Se um ponto a 1/5 da margem esquerda e a 4/5 da margem direita for tocado, 1V será medido.

Figura 14 - Gradiente de potencial na direção x.



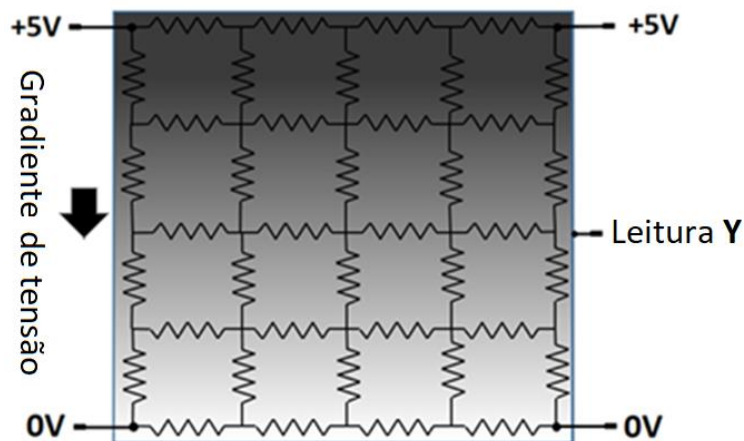
Fonte: Própria (2018)

2.4.2.2 Leitura da tensão no eixo Y

Depois da detecção no eixo x, é feita a leitura no eixo y de forma análoga:

- Aplica-se 5 volts nos eletrodos UL e UR mantendo os eletrodos LL e LR aterrados. Dessa forma, um gradiente de tensão linearmente distribuído na vertical será estabelecido. Essa distribuição se mantém equipotencial ou constante para variações na horizontal, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 - Gradiente de potencial na direção y.



Fonte: Própria (2018)

- Procede-se a leitura no terminal SENSE. Se por exemplo um ponto central ao longo da direção x for tocado, 2,5 V serão medidos no sensor. Se um ponto a 1/5 da margem superior e a 4/5 da margem inferior for tocado, 1V será medido.

As tensões aplicadas aos eletrodos usualmente são oriundas dos pinos de saída dos microcontroladores utilizados. Tais pinos devem ser capaz de fornecer corrente suficiente para alimentar o circuito resistivo da tela conforme solicitada pela malha de ITO utilizada.

Para a tela resistiva de cinco vias são necessários 4 pinos digitais de saída e um pino analógico de entrada.

2.4.2.3 Estratégias de detecção e filtro digital média móvel

Após o processo de leitura das tensões instantâneas nos eixos x e y, os valores são entregues ao ADC do controlador que associa um valor de coordenada de posição para o ponto de toque $P(x,y)$. O processo então se reinicia permitindo a detecção em sequência ao longo do tempo.

As telas sensíveis ao toque, como a grande maioria dos sensores, não estão totalmente livres de falhas. Fatores como pressionamento insuficiente, excessiva velocidade de um toque e as condições de ruído ao qual o sistema está inserido podem gerar erros de leitura. Fabricantes de microcontroladores voltados para a detecção de telas *touchscreen* recomendam algumas estratégias que podem ser assumidas no processo de detecção visando minimizar ou eliminar os erros:

- Utilizar um filtro digital, como o filtro média móvel;
- Rejeitar valores que não se encaixam na média;
- Considerar o tempo mínimo de pressionamento (*debouncing*);
- Converter pelo menos 70 pontos por segundo para cliques isolados e 200 pontos por segundo para detecção de movimento;
- Utilizar uma CPU cujo ADC tenha velocidade suficiente para não introduzir atrasos na detecção.
- Utilizar ADC com resolução de 10 bits MICROCHIP TECHNOLOGY (2007).

Considerando que existe uma capacitância intrínseca ao conjunto “sanduíche” da tela *touchscreen* resistiva, é também uma boa norma aguardar pequena fração de segundo depois de uma leitura até que a próxima seja realizada; tempo necessário para a estabilização depois do transitório de tensão nos eletrodos. Existe um trade-off inevitável entre precisão e taxa de conversão. Medições precisas exigem mais amostras de dados, mas impõe uma menor taxa de conversão. Menores taxas de erro exigem maior complexidade da filtragem (AVR341 ATMEL/MICROCHIP TECHNOLOGY, 2007).

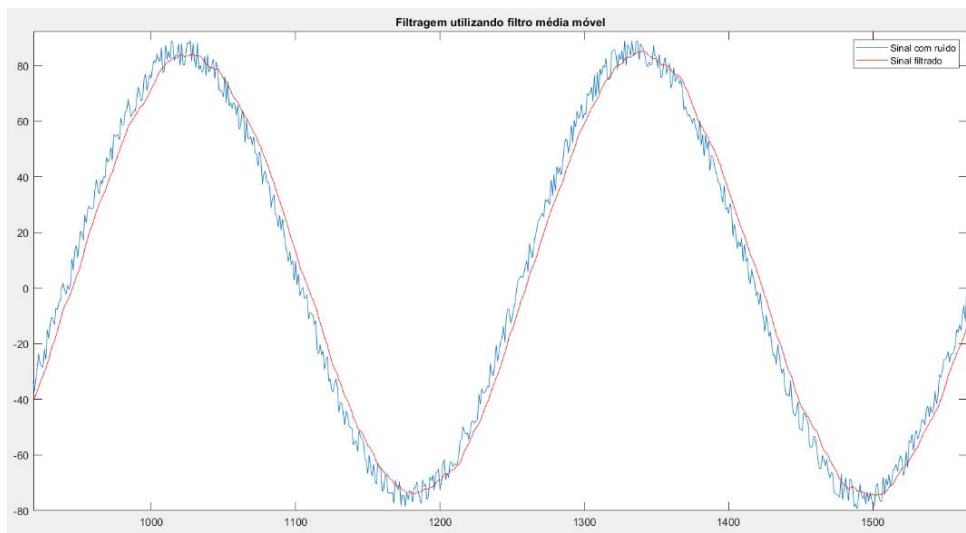
O processo de detecção da atividade de pressionamento das telas *touchscreen* invariavelmente passa pela conversão analógico-digital. O sinal de tensão fornecido pela via SENSE da tela *touchscreen* é submetido à um ADC para posterior associação com uma coordenada de posição sobre a tela. Nesse processo, entretanto, é comum a existência de ruídos que podem corromper a leitura levando a valores falsos da posição de toque. Essas perturbações são causadas por componentes de alta amplitude e curta duração devem ser filtradas antes de passarem pelo ADC.

Uma forma simples e eficaz de fazer esse tipo de filtragem consiste na aplicação de um filtro de média móvel. Um filtro de média móvel de acordo com Steven (1999), é um sistema linear invariante no tempo (LIT), que possui resposta impulsional finita (FIR) e necessita de valores de entrada futuras.

O filtro de média móvel calcula a média aritmética de um bloco contendo os últimos N elementos que chegaram para o conversor. O valor de N não pode ser muito elevado dada a atenuação que o filtro impõe ao sinal, além disso, o tempo requerido para o cálculo da média impõe atrasos à saída do filtro. O filtro média móvel é expresso pela equação (2.9).

$$y(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x(i+j) \quad (2.9)$$

Figura 16 - Forma de onda senoidal adicionada de ruído e sua forma filtrada.



Fonte: Própria (2018)

A Figura 16 mostra o resultado da simulação no software MATLAB onde um filtro média móvel de 10 elementos foi aplicado à uma senóide adicionada de ruído (traçado mais ruidoso). Podemos notar que o filtro suavizou a curva (traçado mais liso) removendo componentes de alta frequência responsável pelas perturbações.

Portanto, o filtro de média móvel se mostra como importante ferramenta no processo de detecção para a tela *touchscreen*.

2.6 SERVO MOTORES

Sistemas de controle mecânicos usualmente requerem dispositivos atuadores rotativos capazes conduzir a planta do sistema a certo valor alvo com precisão e robustez. Um caminho natural para chegar a esse resultado consiste na utilização de servo motores.

Eles são projetados para aplicações de controle de movimento que exigem alta precisão e desempenho. São amplamente utilizados em robótica e sistemas de controle mecânico em geral.

Um servo motor é um dispositivo eletromecânico rotativo com capacidade de atuar sobre processos de controle mecânico com grande precisão. Possuem um eixo principal de saída acoplado a um potenciômetro cuja posição é constantemente monitorada por um sistema de controle em malha fechada capaz de detectar a posição atual e estabelecer uma posição predeterminada. Para aplicações menores, que exigem menos força, utiliza-se um motor DC. São uma solução de baixo custo, fácil utilização e oferecem praticidade ao projetista, uma vez que trazem seu próprio sistema integrado ao dispositivo.

Em um servo DC como o da Figura 17, o motor movimenta as engrenagens e o eixo principal do servo. As engrenagens atuam no sentido de reduzir a rotação do motor transferindo mais torque ao eixo de saída e movimentam o potenciômetro juntamente com o eixo.

Figura 17 - Servo motor típico.

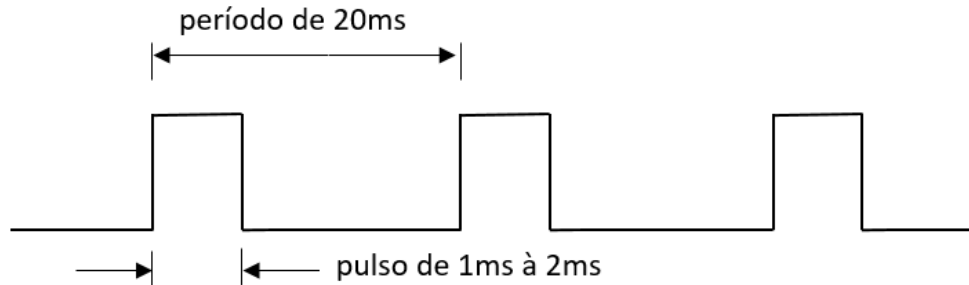


Fonte: (Do Bit ao Byte, 2018)

O ajuste de sua posição é baseado no ciclo ativo de um sinal PWM geralmente de 50Hz com pulsos que variam de 1ms à 2ms, conforme mostra a Figura 18. O circuito de controle monitora este sinal ao longo de seu período, que é de 20 ms. Se neste intervalo de tempo o

controle detecta uma alteração na largura do sinal, ele altera a posição do eixo para que a sua posição coincida com o sinal recebido.

Figura 18 - Sinal PWM de controle de um servo típico.



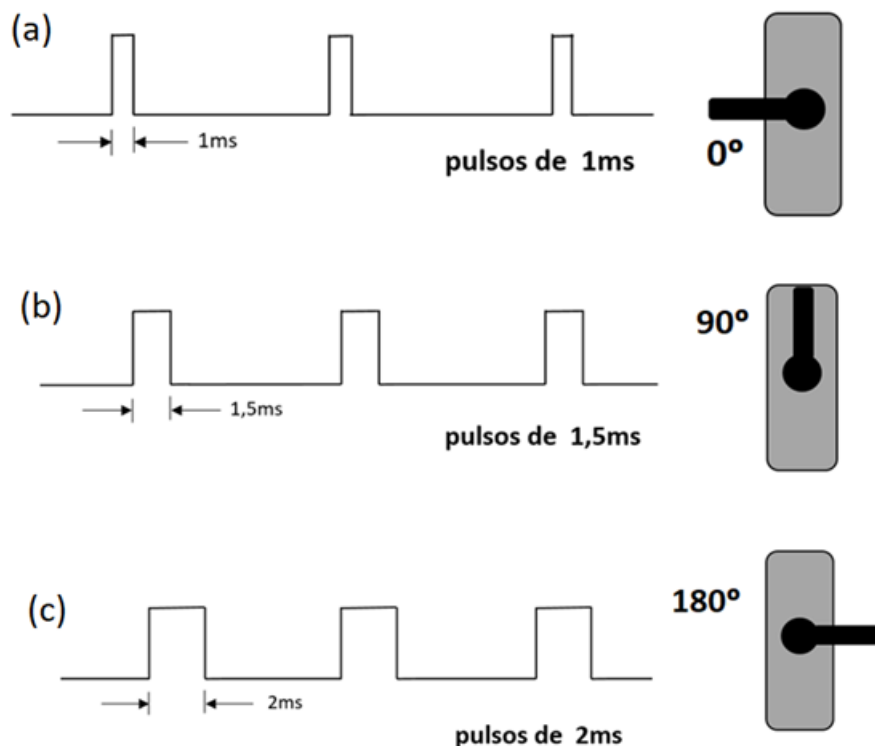
Fonte: Própria (2018)

O ângulo de saída será definido da seguinte forma:

- Se o ciclo ativo for de 1ms, o ângulo será de 0°
- Se o ciclo ativo for de 1,5ms, o ângulo será de 90°
- Se o ciclo ativo for de 2ms, o ângulo de será de 180°

A Figura 19 mostra a posição estabelecida por cada sinal PWM :

Figura 19 - Posição estabelecida de acordo com o ciclo ativo do sinal PWM. Em (a), para pulsos de 1ms, ângulo de 0° . Em (b), para pulsos de 1,5ms, ângulo de 90° . Em (c), para pulsos de 2m, ângulo de 180° .



Fonte: Própria (2018)

Se o servo receber um sinal de por exemplo 1,5ms, ele verificará se o potenciômetro encontra-se na posição correspondente, caso esteja, nada será feito. Se não estiver na posição

correspondente, o circuito de controle acionará o motor até que o potenciômetro esteja na posição correta. A direção de rotação do servo motor dependerá da posição do potenciômetro. O motor vai girar na direção que leva o potenciômetro mais rapidamente na posição correta.

Se uma força externa tentar alterar a posição do servo, experimentará uma resistência exercida pelo motor. Esta resistência é o torque. O torque é uma das principais características do servo motor e é medido em kg-cm (quilograma por centímetro).

2.7 SISTEMAS EMBARCADOS E A PLATAFORMA ARDUINO

O conceito de sistema embarcado é recente na história do desenvolvimento tecnológico. É um neologismo que tem assumido importante papel no desenvolvimento dos sistemas eletrônicos modernos.

De acordo com o site www.embarcados.com.br (2018) um sistema embarcado pode ser entendido como um computador construído para o único propósito da sua aplicação, ao invés de prover um sistema computacional generalizado.

Sistemas embarcados são dotados de um conjunto de software embarcado em hardware projetados para desempenhar uma tarefa específica que corresponde à natureza de sua aplicação. Como exemplo podemos citar o computador de bordo de um automóvel, ou um *smartphone* gerenciado pelo seu sistema operacional, ou ainda os dispositivos inteligentes que monitoram um paciente em uma unidade de terapia intensiva (UTI). O desenvolvimento de sistemas embarcados tem sido fortemente alavancado pela crescente disponibilidade das plataformas eletrônicas de prototipagem. Essas últimas oferecem ao desenvolvedor praticidade e flexibilidade na criação de sistemas autônomos que integram software que controlam dispositivos de hardware como sensores, detectores, atuadores, memórias, etc.

Uma das plataformas de prototipagem mais utilizadas na atualidade é a italiana Arduino.

O Arduino é uma plataforma eletrônica de desenvolvimento composta por hardware e software open-source, isto é, livres. Possui como componente principal de hardware um microcontrolador, tipicamente MICROCHIP/ATMEL, e pode ser programado em linguagem C/C++ através de um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) distribuído gratuitamente. Possui portas de comunicação de entrada e saída para interfaceamento com o mundo externo, sendo altamente configurável oferecendo assim grande versatilidade no processo de desenvolvimento. A placa de Arduino mais difundida é o modelo Arduino UNO, dotada de um microcontrolador de 8 bits da família ATMEGA, entretanto, existem placas dotadas de

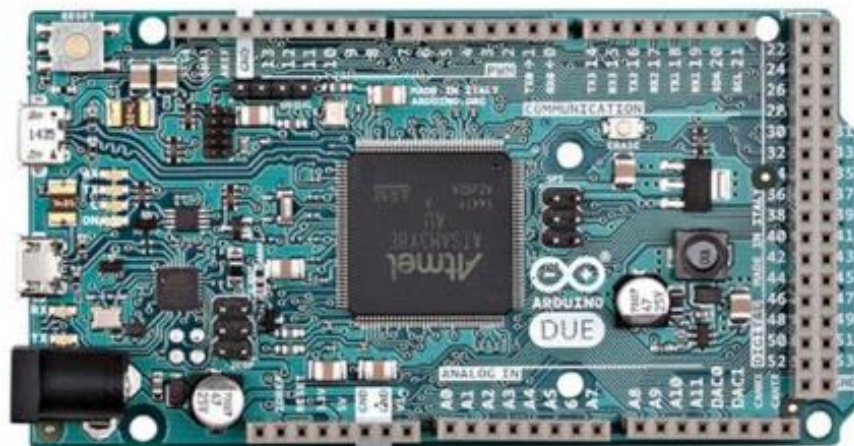
microcontroladores com desempenho superior, como exemplo temos o Arduino Due, mostrado na Figura 20.

O Arduino Due é a primeira placa Arduino baseada em um microcontrolador ARM de 32 bits. Com 54 pinos de entrada / saída digitais, 12 entradas analógicas e velocidade de até 84MHz, é a placa perfeita para projetos poderosos de Arduino em grande escala. (Arduino, 2018)

O Due é dotado de um ADC de 12 bits, o que o torna capaz de converter amostras analógicas pra digital com valores de amplitude na faixa de 0 à 4095. Até 12 dos seus pinos podem ser utilizados pra gerar sinais PWM.

Diferentemente das placas Arduino UNO, que trabalham com sinais de entrada e saída de 5 volts, o Arduino Due opera com tensões de 3,3 volts, requerendo a atenção do desenvolvedor ao conectar dispositivos em suas portas. Uma tensão de 5 volts em uma de suas entradas pode danificar o dispositivo.

Figura 20 - Placa de desenvolvimento Arduino Due.



Fonte: (Arduino, 2018)

CAPÍTULO 3

3 MODELAGEM DE UM SISTEMA *BALL AND PLATE*

Neste capítulo será abordada a modelagem do sistema *Ball and Plate* e a simulação prévia realizada no Matlab para avaliar o comportamento do sistema e realizar a correta implementação.

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem de um sistema de controle tem por finalidade determinar um conjunto de equações algébricas ou diferenciais que possam representar o comportamento dinâmico e estático do sistema em função do tempo. A importância do modelo matemático reside no fato dele permitir a predição do funcionamento do sistema, permitindo assim a sua simulação, análise, otimização e seu controle (Silva, 2001).

O desafio de se modelar matematicamente um sistema como o *Ball and Plate* está na obtenção de um modelo que represente de forma fiel o seu comportamento dinâmico considerando tratar-se de um sistema não-linear. Um processo de linearização deve ser conscientemente empregado de forma que não degrade a integridade da descrição matemática do modelo, garantindo assim a fidelidade do estudo do sistema como um todo.

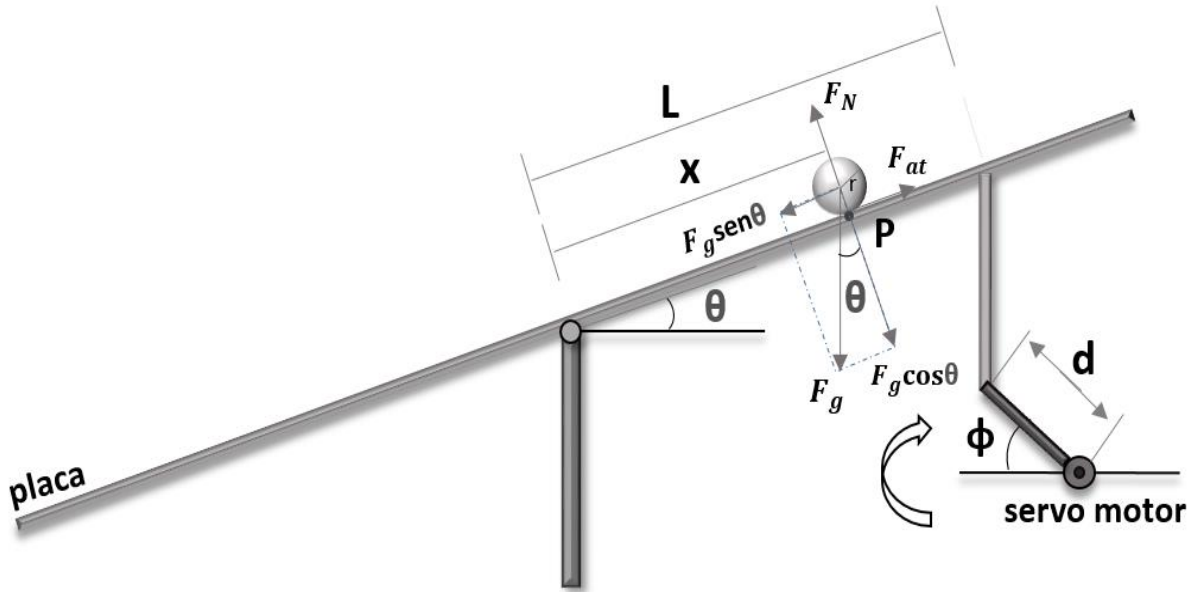
A Figura 21 ilustra o sistema mecânico com as variáveis mais importantes para a determinação de um modelo matemático. A esfera maciça se desloca em dado instante sobre a placa em rolamento suave, ou seja, sem deslizar, no sentido descendente. As forças que atuam sobre a esfera são a força gravitacional F_g , a força normal F_N e a força de atrito F_a que se opõe ao livre movimento da esfera. Considerando por simplicidade que nesse instante o ângulo θ não varia, a componente da força peso na direção perpendicular à placa é cancelada pela força normal uma vez que formam um par de ação e reação, logo, só haverá movimento na direção tangencial.

Aplicando a segunda lei de Newton ($F_{\text{res}} = m \cdot a$), temos :

$$m \cdot g \cdot \sin\theta - F_a = m \cdot a_m \quad (3.1)$$

A equação (3.1) conta que a diferença entre a componente da força peso da esfera na direção do plano e a força de atrito é igual ao produto entre sua massa e a aceleração do seu centro de massa. Devemos observar que, como a esfera está livre para se deslocar, a força de atrito dará origem à um torque sobre o seu centro de massa.

Figura 21 - Deslocamento de uma esfera maciça sobre a placa em rolamento suave.



Fonte: Própria (2018)

Por analogia com a segunda lei de Newton, é possível expressar o torque resultante τ_{res} como função da aceleração angular α produzida pelo torque. Substituímos F_{res} por τ_{res} , m por I_{θ} e a por α , o que nos dá:

$$\tau_{res} = I_{\theta} \cdot \alpha \quad (3.2)$$

onde I_{θ} é o momento de inércia do centro de massa da esfera. O momento de inércia de um corpo que gira informa o grau de distribuição de massa de um corpo sólido em torno de um eixo de rotação. Para uma esfera maciça como a aqui utilizada, o momento de inércia é

$$I_{\theta} = \frac{2}{5} m \cdot r^2 \quad (3.3)$$

A equação (3.2) e (3.3) nos fornecem o caminho para a solução da equação (3.1).

Considerando que o torque é uma força d $L \cdot \theta = d \cdot \phi$, ou $\theta = \frac{d}{L} \cdot \phi$ e torção em torno do centro de massa da esfera através de um braço de alavanca R, podemos escrever:

$$\tau_{res} = F_a \cdot r \quad (3.4)$$

Substituindo (3.2) em (3.3):

$$I_{\theta} \cdot \alpha = F_a \cdot r,$$

Isolando a força de atrito temos:

$$F_a = \frac{I_{\theta} \cdot \alpha}{r} \quad (3.5)$$

Como a esfera rola suavemente, a velocidade linear v_{θ} do seu centro de massa pode ser escrito como $v_{\theta} = \omega r$, logo, a aceleração linear pode ser calculada pela derivada da

velocidade em função do tempo, que resulta em $a_{\text{Cm}} = \alpha \cdot r$. Essa expressão relaciona as velocidades linear e angular do rolamento e é a chave que precisávamos para resolver a equação (2.8). Isolando α temos:

$$\alpha = \frac{a_{\text{Cm}}}{r} \quad (3.6)$$

Substituindo (3.6) em (3.5):

$$F_a = \frac{I_{\text{Cm}}}{r^2} \cdot a_{\text{Cm}} \quad (3.7)$$

que substituindo em (3.1) teremos:

$$mg \cdot \sin\theta - \frac{I_{\text{Cm}}}{r^2} \cdot a_{\text{Cm}} = m \cdot a_{\text{Cm}} \quad (3.8)$$

Assumindo que a esfera é maciça, através da equação (3.3) podemos escrever :

$$mg \cdot \sin\theta - \frac{\frac{2}{5}mr^2}{r^2} \cdot a_{\text{Cm}} = m \cdot a_{\text{Cm}}$$

Que simplificando resulta em:

$$g \cdot \sin\theta - \frac{2}{5} \cdot a_{\text{Cm}} = a_{\text{Cm}} \quad (3.9)$$

É conveniente expressar a aceleração do centro de massa a_{Cm} como função da posição x , uma vez que esta é a variável de saída do sistema, assim podemos escrever a_{Cm} como a segunda derivada do deslocamento no tempo :

$$a_{\text{Cm}} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.10)$$

Substituindo (3.10) em (3.9) e rearranjando:

$$g \cdot \sin\theta - \frac{2}{5} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2}{5} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = g \cdot \sin\theta \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2x}{dt^2} \left(1 + \frac{2}{5}\right) = g \cdot \sin\theta$$

e chegamos em:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{5}{7} g \cdot \sin\theta \quad (3.11)$$

3.1.1 Linearização

Como não conhecemos θ e sabemos que a posição x no tempo será diferente pra diferentes valores de θ , a equação (3.11) configura-se como uma equação diferencial de segunda ordem não linear. Entretanto, para tornar a abordagem matemática realizável, é necessário fazer a linearização dessa equação, eliminando a função *seno* do segundo membro. A linearização é a idealização do problema real, uma aproximação que não interfere no estudo dos resultados do modelo, e é uma prática comum na modelagem de sistemas dinâmicos.

Caso algum componente não linear esteja presente, devemos linearizar o sistema antes que possamos determinar a função de transferência.

O primeiro passo é identificar o componente não linear e escrever a equação diferencial não linear. Quando linearizamos uma equação diferencial não linear, nós a linearizamos para pequenas variações do sinal de entrada em torno da solução em regime permanente quando a variação do sinal de entrada é igual a zero. (NISE, 2016, p.70)

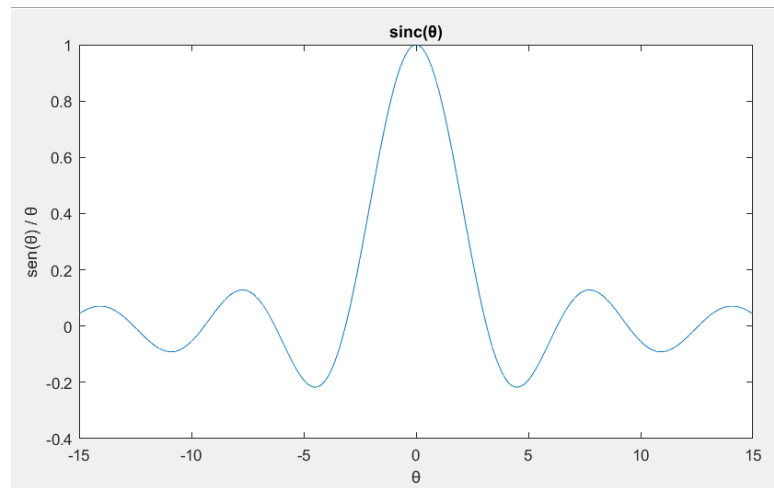
Seguindo essa ideia, para pequenas variações do sinal de entrada, o termo $\text{sen}(\theta)$ pode ser aproximado por θ . Pra provarmos a validade dessa afirmação, podemos nos valer do limite

fundamental do cálculo: $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\text{sen } x}{x}$

De fato, observando o gráfico da função $\frac{\text{sen}(\theta)}{\theta}$ na Figura 22, podemos notar que nas vizinhanças de $\theta = 0$, condição no regime permanente, a função tende para a unidade. Essa função também é conhecida como Sinc, ou Sa. Assim, a equação (3.12) torna-se:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{5}{7} g \cdot \theta \quad (3.12)$$

Figura 22 - Função sinc.



Fonte: Própria (2018)

Dado que θ varia com φ , devemos procurar a relação de dependência entre essas duas variáveis a fim de expressar o problema em termos das variáveis de entrada e saída do sistema.

Observemos na Figura 22 a ligação mecânica entre o braço do servo e a placa. É fácil notar que os elementos mecânicos nesse segmento do sistema têm a mesma velocidade linear. Assim, é válida a igualdade:

$$L.\theta = d.\varphi, \text{ ou } \theta = \frac{d}{L}.\varphi \quad (3.13)$$

Substituindo (3.13) em (3.12) temos

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{5g\varphi}{7L} \quad (3.14)$$

Aplicando Laplace em (3.14) e reorganizando:

$$g \cdot \frac{d}{L} \cdot \phi(s) = X(s) \cdot s^2 \cdot \frac{7}{5}, \quad X(s) \cdot s^2 = \frac{5g}{7L} \phi(s)$$

onde chegamos a

$$\frac{X(s)}{\phi(s)} = \frac{5g}{7Ls^2} \quad (3.15)$$

A equação (3.15) é o modelo matemático que descreve o sistema em malha aberta.

3.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA

A simulação é uma ferramenta de grande utilidade no desenvolvimento de sistemas de controle. Através dela podemos visualizar as características do comportamento dinâmico do sistema tanto no regime transitório quanto no permanente. Ela pode mostrar ao desenvolvedor como o sistema reagirá às condições iniciais de entrada para o sistema natural tal como é sua planta, podendo apontar a necessidade de inserção de um sistema de controle. A simulação é particularmente útil quando da utilização de um sistema controle, onde é possível verificar como as alterações dos parâmetros de controle afetam o comportamento do sistema. As seções à seguir apresentam as simulação do sistema *Ball and Plate* em malha aberta e em malha fechada, e seus respectivos resultados.

3.2.1 Simulação do sistema em malha aberta

A equação (2.22) nos mostra que o sistema em malha aberta tem seus dois polos na origem. Uma simulação com o software MATLAB foi realizada com o objetivo de se observar o comportamento do sistema natural, sem nenhum um tipo de controle aplicado, à uma entrada do tipo degrau.

Ao rodar o script, que pode ser encontrado no anexo desse documento, o MATLAB nos forneceu a seguinte saída:

```
posicao =
    0.981
-----
    0.525 s^2

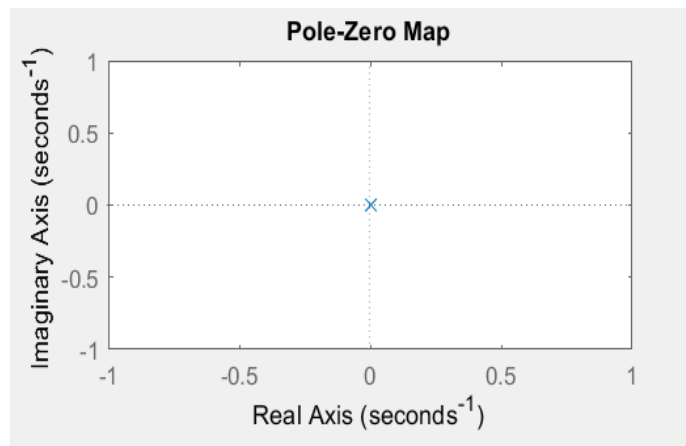
Continuous-time transfer function.
```

O que nos mostra que a função de transferência em malha aberta é:

$$U(s) = \frac{0.981}{0.525s^2} \quad (3.16)$$

E ainda, traça o mapa de polos e zeros e a resposta ao degrau unitário, conforme as Figura 23 e Figura 24, respectivamente.

Figura 23 - Mapa de polos e zeros da função de transferência em malha aberta.

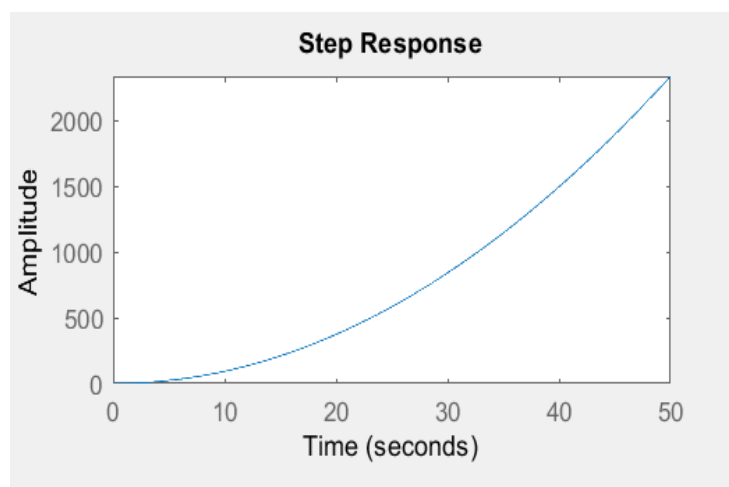


Fonte: Própria (2018)

Pela localização dos polos conforme a Figura 23, podemos concluir que o sistema é instável uma vez que eles estão na origem.

De fato, de acordo com o gráfico da resposta a um degrau unitário apresentado na Figura 24, a amplitude do sinal na saída do sistema aumentará indefinidamente. Dessa forma a esfera será lançada para fora da placa. Essa conclusão nos remete a necessidade de inserir um controlador que venha a tornar o sistema estável.

Figura 24 – Resposta a um degrau unitário em malha aberta.



Fonte: Própria (2018)

3.2.2 Simulação do sistema em malha fechada (com a inserção de um controlador)

A simulação em malha aberta nos mostra que o sistema diverge do valor alvo pré-estabelecido, logo, para que o sistema se torne estável é necessário a inserção de um controlador que o faça convergir para o ponto ajuste desejado.

Á seguir serão apresentados os dados d a simulação do sistema com a inserção de um controlador do tipo proporcional-integral-derivativo (PID. A simulação mostra como o sistema reage a uma entrada do tipo degrau depois da inserção do controlador PID com seus parâmetros já pré-estabelecidos, conforme pode ser visto no código apresentado no anexo desse documento.

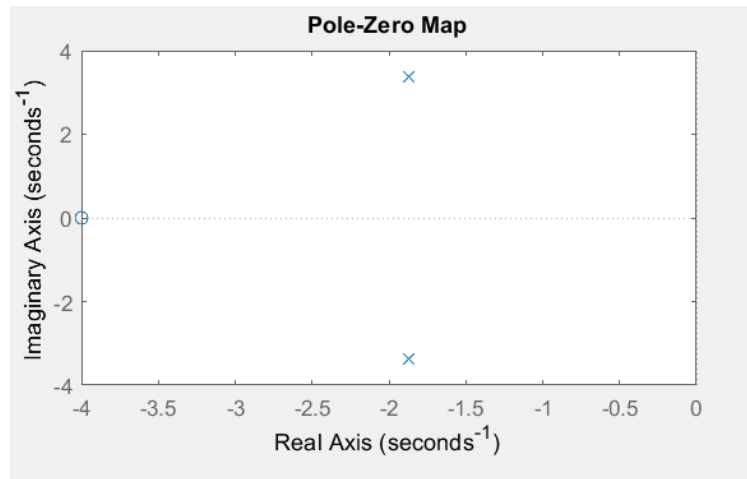
Analisando os dados fornecidos pela simulação, observamos que o controlador inseriu um zero no sistema e deslocou os polos de malha aberta para a esquerda do semi-plano esquerdo. A função de transferência em malha fechada se tornou:

$$U(s) = \frac{1.962s + 7.848}{0.52s^2 + 1.962s + 7.848} \quad (3.17)$$

Inspecionando o mapa de polos e zeros da simulação mostrado na Figura 25, observamos que o sistema agora tem dois polos complexos conjugados, sendo eles :

$$S_1 = -1.87 + 3.38i \quad \text{e} \quad S_2 = -1.87 - 3.38i$$

Figura 25 - Mapa de polos e zeros da função de transferência em malha fechada.

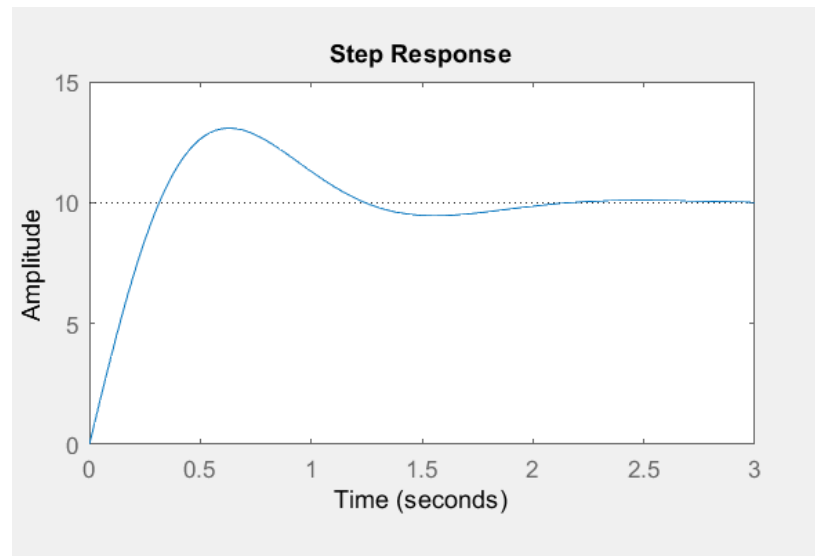


Fonte: Própria(2018)

A Figura 26 mostra o gráfico da resposta transitória, onde vemos que o sinal atinge um máximo sobre sinal depois de 0,5 segundo e se mantém estacionário depois de 2 segundos. Portanto, o controlador PID inserido tornou o sistema estável.

De fato, conferindo na tabela 2, um sistema cujos polos têm parte imaginária não nula e parte real negativa é estável.

Figura 26 - Resposta à um degrau unitário em malha fechada.



Fonte: Própria (2018)

CAPÍTULO 4

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados, seus respectivos custos e a metodologia adotada para as etapas de desenvolvimento do protótipo, que compreendem desde a elaboração da estrutura mecânica, o desenvolvimento da eletrônica e do *software*, tópicos explorados em detalhes no próximo Capítulo.

4.1 MATERIAIS E CUSTOS

Para a execução do projeto os seguintes materiais foram necessários:

- Computador pessoal dispondo de software com ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) voltado à programação de sistema embarcado;
- Software aplicativo *Virtuino* com seus módulos *cliente e servidor*
- Placa de desenvolvimento *Arduino Due*;
- Tela *touchscreen* de 5 vias, 15 polegadas;
- Servo motores Hitec HS-303;
- Esferas metálicas de aço cromo
- Componentes eletrônicos: Regulador de tensão LM7806, capacitores, resistores;
- Estrutura de alumínio: Perfis de alumínio, chapas, barras chatas, tubos, cantoneiras;
- Barras roscadas, parafusos especiais, brocas, pontas montadas
- Outros: Placa de circuito impresso, placa de acrílico, barras de pinos, soquetes, percloroeto de ferro, lixas, Serra esquadria, furadeira de bancada, micro retífica.

O custo estimado do projeto é indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Preços dos hardwares utilizados.

<i>Produto</i>	<i>Preço</i>
<i>Arduino Due</i>	R\$ 100,00
<i>Servos FUTABA S3003</i>	R\$ 250,00
<i>Tela sensível ao toque resistiva</i>	R\$ 500,00
<i>Esferas metálicas de aço cromo</i>	R\$ 90,00
<i>Estrutura de alumínio</i>	R\$ 120,00
<i>Outros</i>	R\$ 50,00
<i>Total</i>	R\$ 1.110,00

Fonte: Mercado Livre, 2018.

4.1.1 SOFTWARES UTILIZADOS

Para o funcionamento do protótipo foram utilizados softwares de uso comum como a IDE do Arduino para gravação do microcontrolador e o MATLAB para simulações, e outros dois softwares complementares:

- **Orcad:** É um software de propriedade da Cadence Design Systems voltado para simulação e projeto de circuitos eletrônicos. Seu módulo Orcad Capture permite ao projetista criar o design do esquemático eletrônico, enquanto os módulos Orcad Layout e Orcad PCB oferecem diversas ferramentas para criação de placas de circuito impresso (PCI), desde faces simples até as mais complexas com várias camadas. Depois da finalização do projeto é possível exportar os arquivos em formato GERBER, um padrão utilizado pela indústria e que automatiza o processo de fabricação utilizando máquinas CNC. Pela sua simplicidade, a PCI do presente projeto foi confeccionada por processo manual através da transferência térmica para a placa utilizando papel fotográfico e procedendo a corrosão por meio de ácido perclorato de ferro.
- **Virtuino:** O *Virtuino* é um aplicativo para criação de interfaces gráficas em dispositivos Android. Através dele é possível criar interfaces de controle e monitoramento inserindo *widgets* como botões, chaves, *sliders*, *leds*, *displays* dentre muitos outros. Para a utilização do *Virtuino* é necessário fazer a instalação do *app* no dispositivo móvel e de sua biblioteca no computador onde será desenvolvido o software para sua comunicação. É possível utilizar conexão bluetooth, Wifi e Ethernet. No sistema *Ball and Plate* aqui desenvolvido foi utilizada comunicação via bluetooth, cuja biblioteca cria uma classe chamada *virtuinoBluetooth*. Sua instância fornece todos os métodos e atributos necessários para a comunicação com a interface remota via conexão *bluetooth*.

4.2 METODOLOGIA

O projeto foi desenvolvido seguindo as seguintes etapas de desenvolvimento:

1- Revisão Bibliográfica

Em um primeiro momento, foi realizada uma pesquisa bibliográfica contemplando o referencial teórico partindo da bibliografia específica, se estendendo à artigos e trabalhos já existentes acerca do sistema *Ball and Plate*, justificando a utilização da tela resistiva em relação ao uso do sistema de visão computacional.

2 -Levantamento de Requisitos e Modelagem

Após a revisão bibliográfica e análise dos projetos, foi realizado o levantamento de requisitos necessários para realização do projeto, bem como quais tecnologias serão usadas em temas de hardware e software, e a teoria sobre a modelagem do sistema.

3 – Simulação em software

Com a teoria e os modelos estabelecidos, foram realizadas simulações por meio do software MATLAB para verificar o comportamento do sistema, investigando a necessidade de inclusão de um sistema de controle automático.

4 – Construção do Sistema *Ball and Plate*

A etapa seguinte foi a construção física do protótipo segundo o projeto, levando em conta o material encontrado na literatura e as experiências anteriores, focando na correta operação da tela resistiva.

5 – Implementação no Sistema Embarcado

Após a conclusão da construção mecânica e da eletrônica, foi elaborado o software embarcado do sistema e execução dos primeiros testes de validação.

6 – Implementação da Interface

Uma das últimas etapas foi a elaboração de um aplicativo para controlar o sistema via comunicação Bluetooth. Foi utilizado o software Virtuino para criar o layout e a configuração dos parâmetros.

7 – Avaliação e Comparação entre Sistemas

Após a implementação e validação do sistema, foi realizado alguns testes de comparação em relação ao antigo sistema, visando entender em quais aspectos houveram ganhos de desempenho.

CAPÍTULO 5

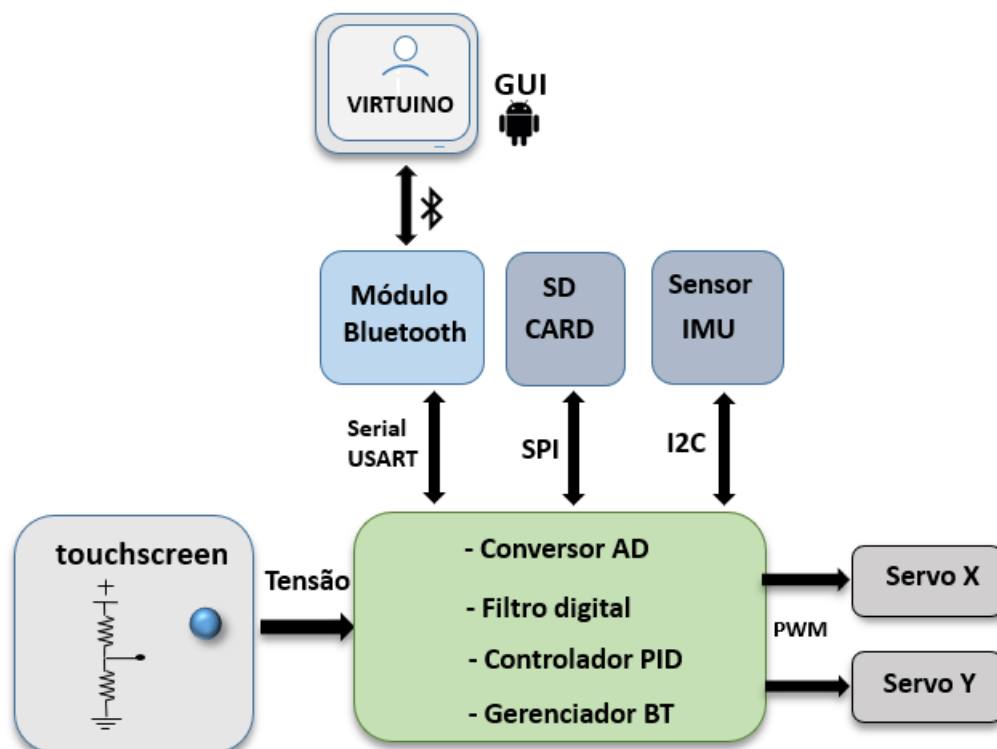
5 DESENVOLVIMENTO

Os resultados obtidos a partir da modelagem e simulação nos dão o suporte necessário para a construção da estrutura de controle dinâmico de forma consciente, diminuindo a probabilidade de erros de projeto. Esses dados também são valiosos para a solução de problemas de ajustes na resposta dinâmica e sintonia do PID.

Conforme descrito no Capítulo 2, o sistema *Ball and Plate* é dotado de um controlador automático de posição associado à um sistema de sensoriamento e outro de atuação para conduzir e manter a planta em posição de equilíbrio. Todavia, para agregar outras funcionalidades, além dos componentes básicos de um sistema de controle, o protótipo aqui desenvolvido conta com diversos componentes auxiliares, abordados em tópicos posteriores.

Sua estrutura geral pode ser visualizada através do diagrama de blocos apresentado na Figura 27. Todos os componentes do diagrama serão descritos em tópicos posteriores.

Figura 27 - Diagrama de Blocos Conceitual do Projeto.



Fonte: Própria (2018)

Um problema geralmente associado a esse tipo de projeto é a inserção de ruídos indesejáveis de fontes diversas podendo ser de ordem mecânica, elétrica ou eletromagnética. É

desejável que a planta do sistema juntamente com toda a estrutura de controle associada não imponha nenhum tipo de distúrbio que venha a interferir no desempenho do sistema de controle.

Devemos garantir que todos os componentes mecânicos elétricos e eletrônicos utilizados guardem compatibilidade e coerência com a aplicação. Pensando nisso começamos a construção do protótipo pela estrutura mecânica base, primando sempre pela boa qualidade dos materiais empregados e das técnicas utilizadas no processo de montagem.

5.1 ESTRUTURA MECÂNICA

Conforme mencionado anteriormente, as características mais desejadas do sistema são a estabilidade e precisão no controle dos movimentos. Devemos por isso garantir que ele seja montado sobre uma estrutura mecânica suficientemente forte e estável para não sofrer deformações pela força dos movimentos naturais quando da utilização da plataforma.

Assim, inicialmente foi construída uma estrutura rígida de alumínio na liga AA6063, onde todas as partes foram cortadas utilizando serra esquadria com disco de 10 polegadas próprio para corte em alumínio. A posição de instalação de cada uma das hastes foi determinada mantendo coerência com as dimensões do sistema mecânico modelado e simulado conforme já apresentado. A Figura 28 mostra o aspecto dos cortes e furação da estrutura básica.

Figura 28 - Peças do sistema *Ball and Plate*, cortadas e furadas.



Fonte: Própria (2018)

A furação foi feita por meio de furadeira de bancada e microretífica utilizando brocas de aço rápido. Para a montagem foram utilizados parafusos M3 do tipo ALLEN com cabeça sextavada internamente. As roscas no alumínio foram feitas utilizando o próprio parafuso partindo de um furo feito por uma broca de aço rápido de 7/64in, que equivale à 2.778mm.

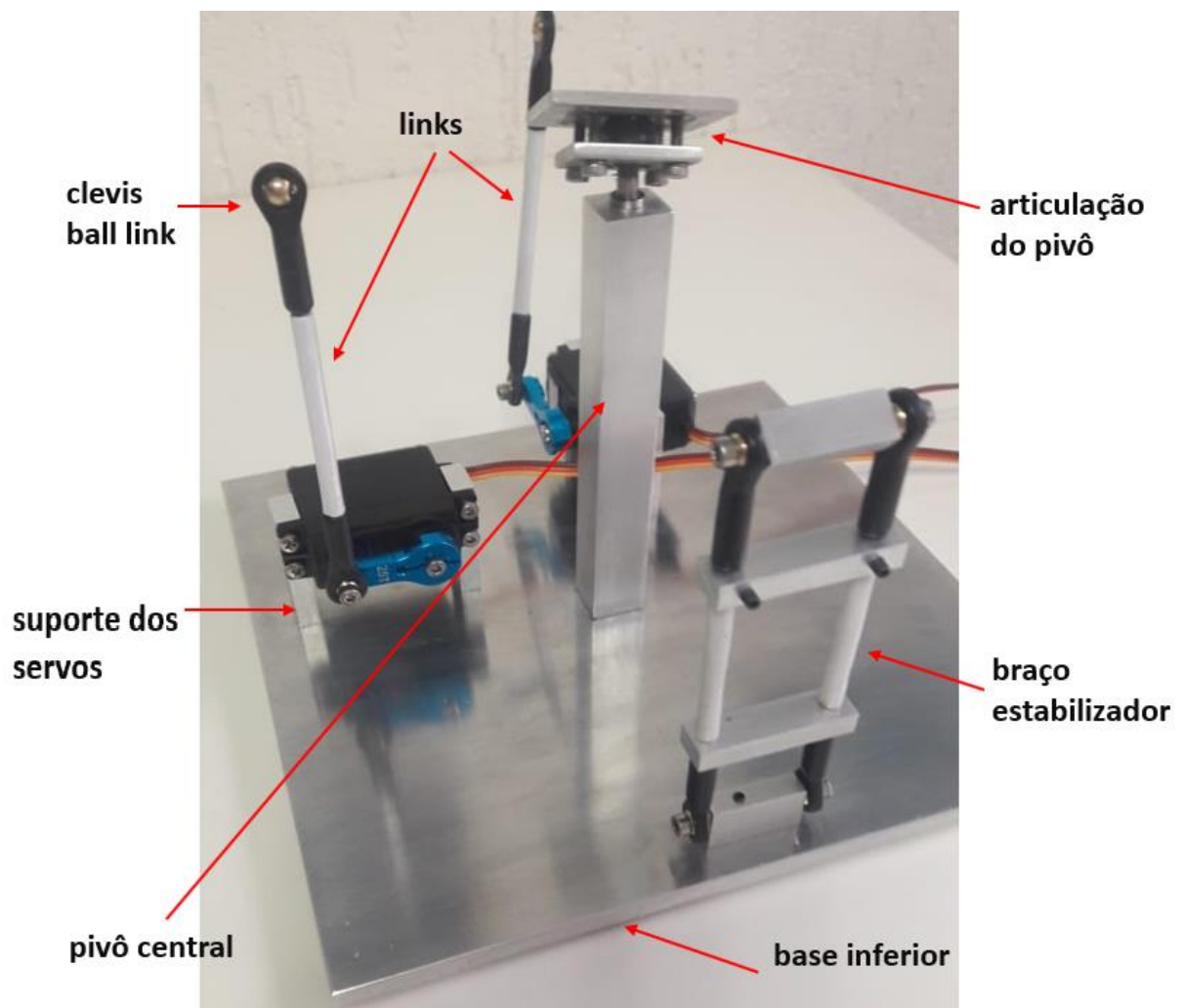
A seguir a descrição das principais partes mecânicas:

- **Base inferior:** é uma base de seção quadrada com dimensões 20x20cm cortada à partir de uma chapa de ¼” de espessura. É a base sobre a qual todos os demais componentes do sistema serão montados;
- **Suportes para os servos motores:** São compostos por duas hastes de 4cm de altura construídas através de barra chata com seção transversal de 1/4in x 1/2n. Foram afixados por meio de parafusos partindo da parte inferior da base transpassando o alumínio com rosca de aproximadamente 15mm de profundidade. Foram utilizados 4 parafusos para as hastes de cada servo;
- **Pivô central:** é composto por uma haste de 12cm de altura construída através de barra chata com seção 5/8in e uma articulação construída com barras chatas de alumínio com 1/8in de espessura adequadamente cortadas e furadas para abraçar um pivô esférico. Essa articulação permite a livre inclinação da placa sobre o pivô. A haste do pivô central foi afixada por meio de 5 parafusos M3 partindo da parte inferior da base transpassando o alumínio com rosca de aproximadamente 15mm de profundidade. Isso permitiu uma instalação mecanicamente firme e robusta.
- **Braço mecânico estabilizador:** uma característica indesejada que frequentemente está presente nesse tipo de projeto é o movimento de giro em torno do eixo vertical Z resultante do torque que os servos impõem sobre a placa. Porém, o *Ball and Plate* atua com 2 graus de liberdade no movimento sobre a placa, permitindo que se movimente apenas em torno dos eixos X e Y do plano horizontal. A fim de evitar esse movimento foi construído um braço mecânico articulado segmentado em duas partes onde uma extremidade está presa à base por meio de uma articulação e a outra está presa à placa. Esse mecanismo restringe os movimentos não permitindo que a placa gire em torno do eixo vertical Z que contém a haste do pivô central. Na construção do braço mecânico estabilizador foram empregadas duas barras roscadas de 3mm firmemente parafusadas a *clevis* do tipo *ball link*. As barras roscadas foram unidas por meio de barras de alumínio com seções transversais de 1/4in x ½ in.

- **Linkagem:** é o sistema de conexão mecânica empregada para conectar os servos à placa. É composto por hastes construídas com barras roscadas de 1/8in parafusadas à clevis do tipo *ball link*. Do lado do servo os links são conectados por meio de parafusos aos braços mecânicos que giram conectados aos eixos dos servos. Do lado da placa são igualmente parafusados à estruturas denominadas *horns* (chifres) colados ao acrílico que fixa a tela *touchscreen*.

A indicação de toda esta estrutura básica é apresentada na Figura 29.

Figura 29 - Estrutura mecânica do Sistema *Ball and Plate*.

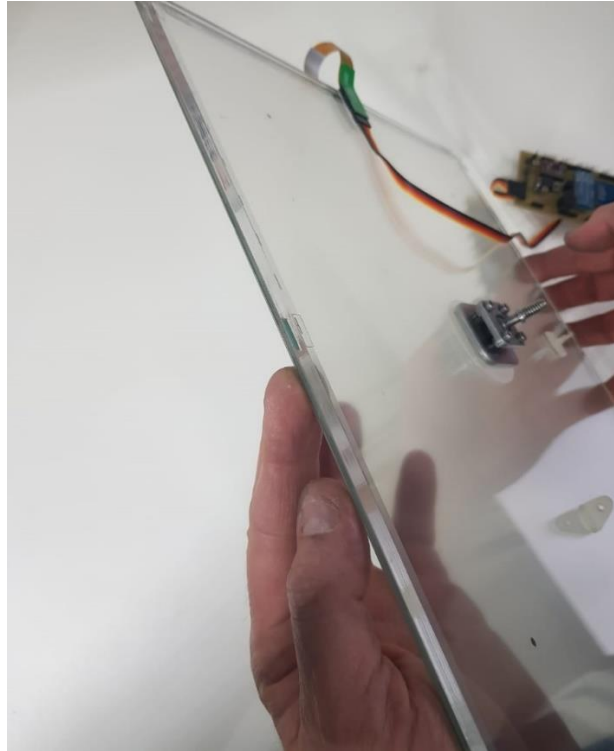


Fonte: Própria (2019)

No topo da estrutura mecânica e perfeitamente centralizada sobre a articulação do pivô central foi instalada uma placa acrílica com área de 289X356mm, mesma área da tela. Essa placa desempenha o importante papel de proteger o *touchscreen*, recebendo-o de forma justaposta e unindo-se a esse por meio de fita adesiva dupla face. Da mesma forma, o conjunto

touchscreen e placa acrílica é fixado sobre a articulação do pivô, também por meio de fita dupla face, a figura 30 mostra o conjunto.

Figura 30 - conjunto *touchscreen*/placa acrílica/articulação do pivô.



Fonte: Própria (2019)

Figura 31 - Esfera aço cromo 35mm de diâmetro.



Fonte: Ana Luisa Vital (2019)

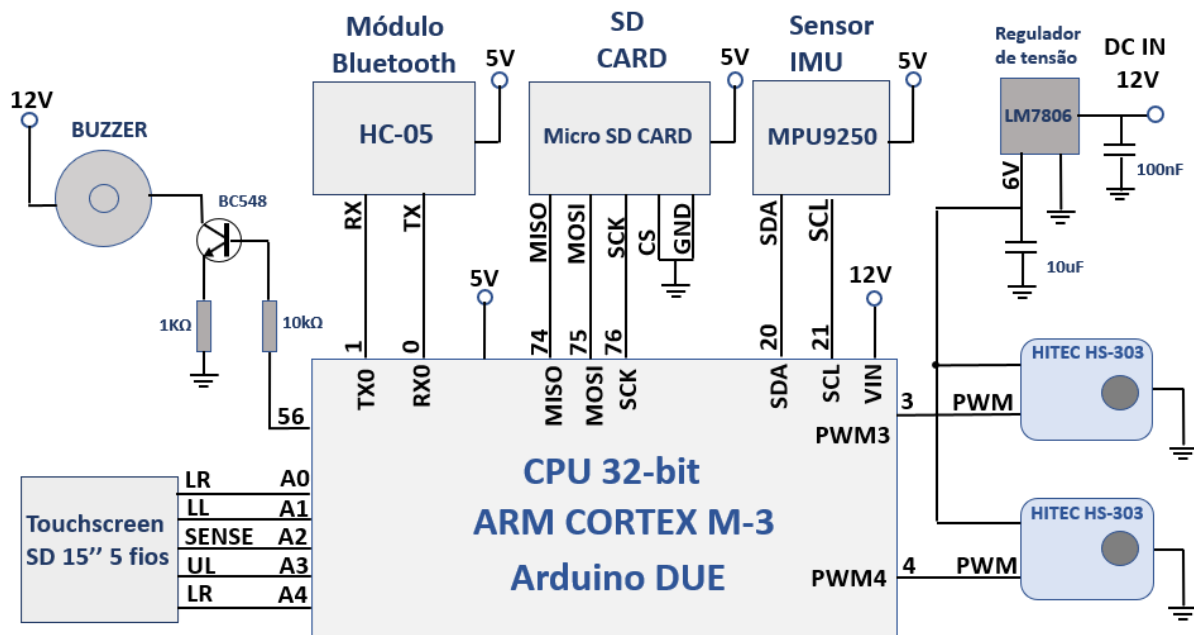
A esfera utilizada é de aço cromo maciço com diâmetro de 35mm e massa de aproximadamente 175g. A importância de uma esfera metálica como a mostrada na figura 31 está na sua alta massa específica, muito adequada para um rolamento suave estável por ter alto momento de inércia, além de exercer pressão suficiente para ativar o *touchscreen*.

5.2 ESTRUTURA ELETRÔNICA

O *Ball and Plate* é um sistema de controle em tempo real onde a variável tempo pode se tornar um fator crítico para o seu pleno funcionamento. A cada instante a central de controle precisa determinar a posição da esfera por meio de uma conversão AD, fazer uma série de cálculos matemáticos para determinar a melhor ação de controle para seu equilíbrio, além de enviar o resultado para os servos atuarem de forma correta. Além disso, deve monitorar continuamente a conexão *bluetooth* e chegada de dados da interface do usuário e processá-los. Isso nos conta sobre a necessidade de uma CPU suficientemente rápida para atender a todas as demandas. Daí a utilização de um microcontrolador de ARM. A placa Arduino Due mostrou-se convenientemente adequada para a aplicação.

O diagrama referente a eletrônica é indicado na Figura 32, onde cada módulo será explicado nos itens a seguir.

Figura 32 - Diagrama esquemático do sistema.



Fonte: Própria (2018)

A alimentação para o sistema provém de uma fonte DC externa que pode estar na faixa de tensão de 8-12V com capacidade de fornecimento de pelo menos 1A. É conectada à plataforma por meio de um conector do tipo P4, comumente utilizado em fontes de alimentação ou adaptadores DC.

A seguir a descrição dos principais componentes do sistema eletrônico:

- **Central de controle:** É o *hardware* do sistema embarcado responsável por todo o gerenciamento da plataforma. Foi implementado por meio da placa Arduino Due que é baseada em um microcontrolados ARM Cortex-M3 que trabalha com *clock* 84MHz e conversor AD de até 10 bits (podendo ser 12 bits). O Arduino Due conecta-se fisicamente a uma placa auxiliar que será apresentada em tópico seguinte. O algoritmo do controlador PID está embarcado na central de controle;
- **Módulo Bluetooth:** Um módulo *Bluetooth* HC-05 integrado à placa auxiliar permite a comunicação entre a interface gráfica e a plataforma. Ele se comunica através da porta serial 3 do módulo USART utilizando seu par RX e TX conectados ao par TX3 e RX3 do Arduino Due nos pinos D14 e D15, respectivamente. Recebe alimentação de 5V fornecida pelo regulador de tensão do Arduino;
- **Leitor/gravador de SD CARD:** É um leitor/gravador de cartão de memória utilizado para persistência dos dados da plataforma. Dados como o estado geral de configuração, formas geométricas das trajetórias a serem seguidas pela esfera e níveis de resposta do PID podem ser armazenados e recuperados a qualquer momento. O dispositivo foi instalado diretamente na placa auxiliar e se comunica com o controle central através de protocolo SPI utilizando as vias MISO, MOSI E CLK nos pinos 74, 75 e 76, respectivamente;
- **Sensor inercial (IMU):** Um sensor inercial dotado de acelerômetro foi integrado ao sistema para detectar uma possível inclinação na instalação e uso do protótipo e informar a central de controle para que esta corrija os efeitos indesejados do desnivelamento. A comunicação entre a central de controle e o acelerômetro é estabelecida através de protocolo I2C utilizando as linhas de dados e clock SDA e SCL nos pinos 20 e 21, do Arduino Due, respectivamente. O módulo IMU utilizado é o MPU-9250;
- **Servos:** São os atuadores do sistema de controle. Recebem pulsos PWM da central de controle e modificam a inclinação da placa através de *links* mecânicos que ligam as duas partes. Os pulsos variam de 1500us, correspondente à posição de 0 grau, até 2500us, quando atingem 180 graus. Sua posição central atingida com pulsos de ciclo ativo de 2000us. São alimentados com 6 volts por meio de um regulador de tensão LM7806 instalado na placa auxiliar. A drenagem de corrente está condicionada a carga aplicada. Para a condução da placa a corrente assume valor máximo de 500mA por unidade;

- ***Touchscreen:*** Tela sensível ao toque que detecta a posição corrente da esfera. É um dispositivo eminentemente analógico cujas saídas passam por um processo de conversão analógico-digital gerenciado pelo software embarcado na central de controle. O *touchscreen* empregado é do tipo *standart definition* (SD) com relação de aspecto 4:3 com tamanho de 15 polegadas sendo do tipo resistiva de 5 fios. O *touchscreen* é o sensor do sistema de controle, por este motivo requer cuidados especiais no seu tratamento mecânico e elétricos. Foi assentado sobre uma placa acrílica de 5mm de espessura tendo a mesma área da tela;
- ***Buzzer:*** Atua como um sinalizador de áudio alertando o usuário para a ocorrência de eventos importantes, como exemplo uma falha na conexão *Bluetooth*. O *buzzer* é conectado ao pino D56 do Arduino e configurado como saída. Foi utilizado um transistor como driver de corrente, posto que aquele dispositivo excede a capacidade de fornecimento do pino do microcontrolador, que é de cerca de 25mA. O *buzzer* emite um apito ao receber um trem de pulsos de onda quadrada com frequência audível;
- **Interface gráfica do usuário:** Estabelece a relação homem-máquina na utilização do sistema. Implementada através de um dispositivo móvel podendo ser um smartphone ou tablet rodando sistema operacional Android e se comunica com a plataforma de controle através do módulo de conexão *Bluetooth*. Os componentes gráficos bem como a comunicação com o sistema embarcado que gerencia o protótipo foram desenvolvidos por meio do aplicativo *VIRTUINO*. A interface gráfica e o *Virtuino* serão abordados em tópico posterior;

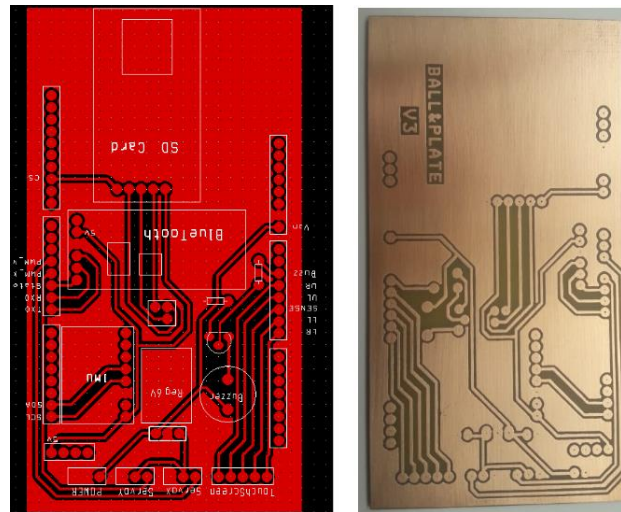
5.2.1 Confecção da Placa auxiliar

Com vista na otimização de espaços e organização nas conexões entre CPU e periféricos externos, uma placa auxiliar foi projetada de modo a integrar fisicamente todos os componentes eletrônicos da plataforma.

A placa auxiliar acopla-se à placa da CPU por meio de barras de pinos, a exemplo dos *Shields* para Arduino. Ela provê ainda os pinos para as conexões entrada de alimentação e *touchscreen* e de saída para os servos motores.

O software ORCAD, um CAD voltado para o desenvolvimento de circuitos eletrônicos foi utilizado para a criação do layout da placa de circuito impresso com base no esquemático da Figura 33.

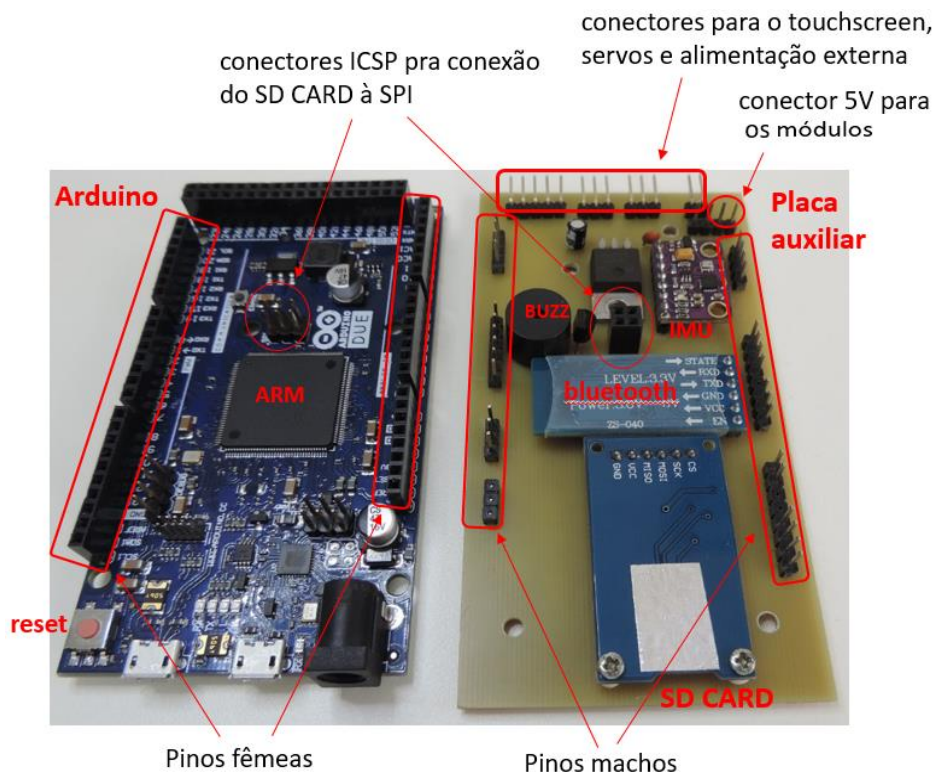
Figura 33 - Projeto e confecção da placa de circuito impresso.



Fonte: Própria (2019)

A placa foi projetada com base nas dimensões da placa Arduino Due mantendo justa relação com a localização dos pinos para um acoplamento adequado. Atenção especial precisou ser tomada para garantir o perfeito encontro entre os pinos fêmeas e machos das duas placas. Os componentes eletrônicos foram providencialmente localizados para o compartilhamento dos espaços envolvendo as duas placas. A Figura 34 mostra os principais periféricos e conexões entre as placas.

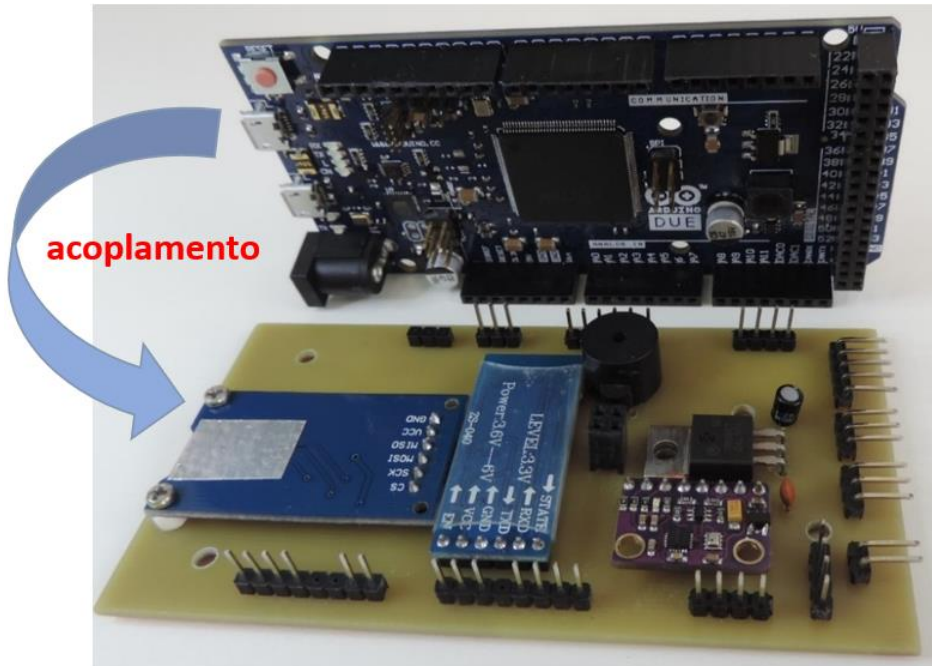
Figura 34 - Principais periféricos e conexões da placa eletrônica.



Fonte: Própria (2019)

Furos passantes foram abertos através da placa auxiliar para a devida fixação à base da plataforma por meio de parafusos. O leitor/gravador SD CARD foi posicionado de forma a permitir a livre inserção e ejeção do cartão sem a necessidade de ferramenta auxiliar. Os pinos desse periférico foram conectados à SPI da CPU através do conector ISP do Arduino Due.

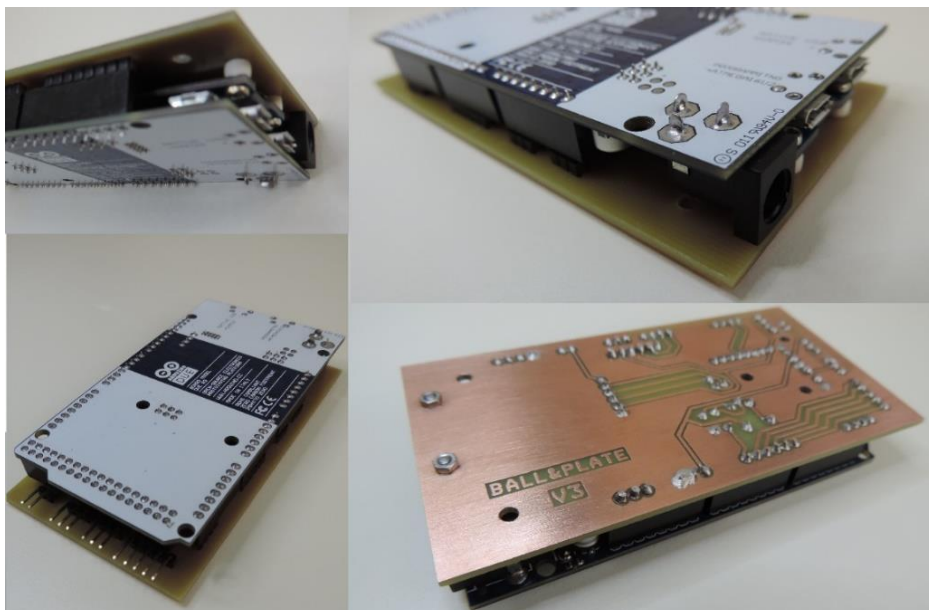
Figura 35 - Acoplamento da placa auxiliar com o Arduino Due.



Fonte: Própria (2019)

O efeito do acoplamento das duas peças é o de uma única peça com todos periféricos integrados, como mostra a Figura 36.

Figura 36 - Placa final do *Ball and Plate* montada e acoplada.



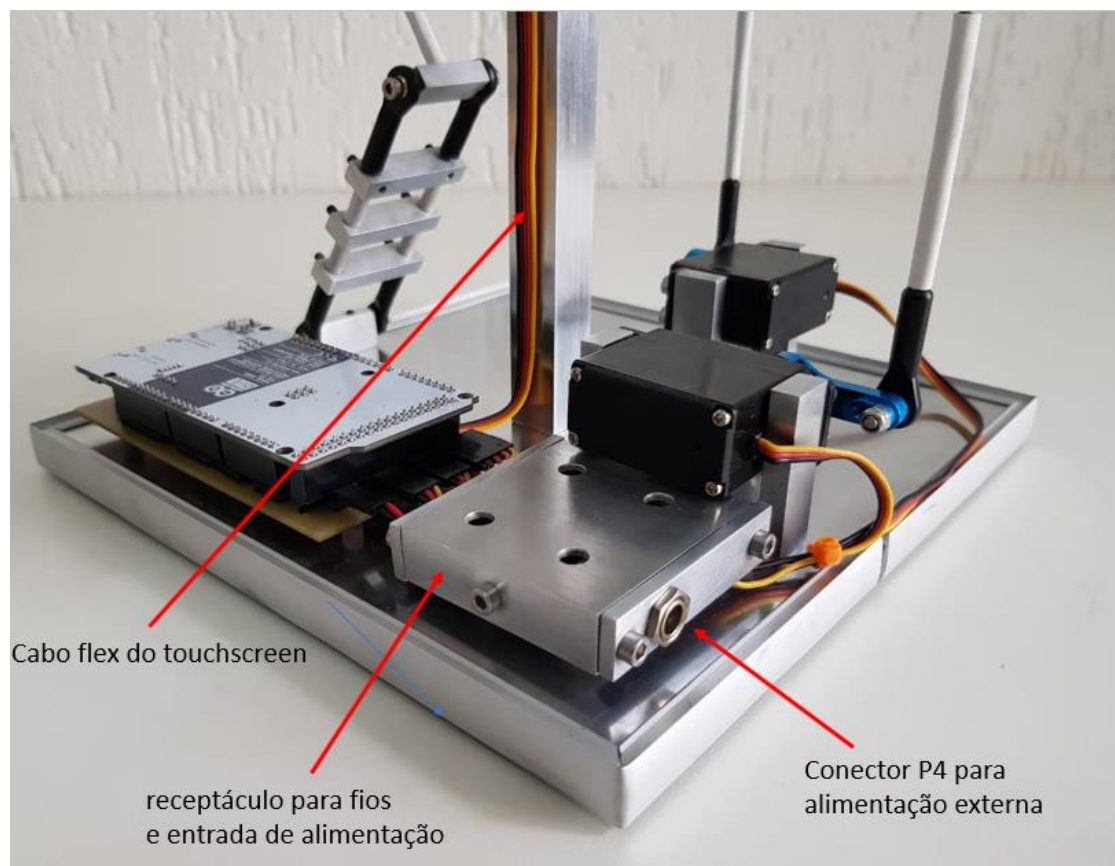
Fonte: Própria (2019)

Para organização da fiação e entrada de alimentação externa foi desenvolvido um receptáculo que confina os fios e serve como estrutura para fixação mecânica do conector de alimentação externa. Essa estrutura de alumínio foi fixada próxima aos pinos de conexão externa da placa auxiliar por meio de parafusos fixos na base.

Por razões de compatibilidade eletromagnética a fiação do *touchscreen* foi instalada por uma rota afastada dos fios dos servos. Uma vez que esse dispositivo é sensível à interferências, seu cabo flexível precisou ser cuidadosamente conduzido e fixado por meio de fita adesiva dupla face no seu caminho até as portas do microcontrolador.

O cabo parte da extremidade da tela passando sob a placa acrílica e descendo pela haste do pivô central até a base da plataforma. Daí segue pela base até os pinos de conexão na placa auxiliar. A Figura 37 mostra o confinamento dos fios dos servos e alimentação e a fixação do cabo do *touchscreen*.

Figura 37 - Indicação da fiação do *touchscreen*, servos e alimentação.



Fonte: Própria (2019)

5.3 SOFTWARE EMBARCADO E FUNCIONALIDADES

O software embarcado na central de controle promove o gerenciamento de toda a plataforma e sua comunicação com a interface do usuário, logo, é uma parte integrante fundamental do sistema. Foi desenvolvido com o propósito de promover a plena comunicação e interação entre os componentes de hardware explorando todas as suas qualidades potenciais, além de mitigar os eventuais problemas oriundos das limitações de cada componente.

Foi desenvolvido em linguagem C utilizando funções nativas do Arduino, dentre outras. Para dinamizar o processo de codificação e depuração do software foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) Atmel Studio 7 juntamente com a extensão para Arduino. Para o desenvolvimento da interface gráfica com o usuário foi utilizado um dispositivo móvel dotado de sistema operacional Android e aplicativo Virtuino específico para construção de GUIs.

Por razões didáticas o software foi dividido em quatro partes principais que trabalham de forma coordenada e simultânea. Essas partes evoluem através de uma sequência de iterações que ocorrem a uma frequência correspondente a frequência de amostragem do sistema. Elas podem ser classificadas da seguinte forma:

- **Aquisição dos dados:** É a primeira etapa desenvolvida no processo de criação do software. Consiste basicamente na leitura disciplinada da posição corrente da esfera sobre a placa;
- **Processamento do PID:** De posse dos dados de entrada lidos no sensor e do ponto de ajuste (set point) definido pelo usuário, pôde-se desenvolver um algoritmo que executa cálculos matemáticos e determina os valores de saída para cada uma das ações de controle. A soma dessas ações corresponde à saída do controlador PID;
- **Saída para os atuadores:** Os cálculos são enviados aos servos que impõem movimento de inclinação adequado para estabelecer o equilíbrio;
- **Interação com usuário:** Nessa etapa foi desenvolvido um sistema de interfaceamento homem-máquina através de interface gráfica remota na qual o operador pode a qualquer momento intervir na atividade da plataforma.

5.3.1 Aquisição dos Dados

A tela *touchscreen* é fornecida acompanhada de uma pequena peça de hardware responsável pelo seu interfaceamento com um computador rodando sistema operacional

Windows, Linux ou macOS. Essa peça não tem utilidade no presente projeto posto que a CPU aqui utilizada é um microcontrolador desprovido de sistema operacional como os citados.

Diferentemente da sua aplicação usual, o *touchscreen* foi aqui conectado diretamente aos pinos do microcontrolador, conforme correspondência mostrada no Quadro 3. Foi então desenvolvido um algoritmo para a conversão AD e determinação das coordenadas de posição do toque pela esfera.

Quadro 3 - Pinos utilizados para *Touchscreen*.

Eletrodos do <i>touchscreen</i>	Pino Arduino	Tipo de pino	Direção
LR (Inferior direito)	D61	Digital	Saída
LL (Inferior esquerdo)	D60	Digital	Saída
SENSE (Sensor)	A5	Analógico	Entrada
UL (Superior esquerdo)	D58	Digital	Saída
UR (Superior direito)	D57	Digital	Saída

Fonte: Própria (2019)

Podemos observar no quadro que os pinos do microcontrolador associados aos eletrodos do *touchscreen* são configurados como saída digital, ao passo que o pino associado ao sensor é definido como entrada de tensão analógica. De fato, os gradientes de tensão necessários para a leitura são estabelecidos pelos níveis lógicos impostos pelos pinos digitais enquanto a entrada analógica recebe a tensão do pino SENSE para conversão AD e determinação das coordenadas x e y.

O algoritmo utilizado para leitura da posição corrente da esfera segue os seguintes passos:

- **Coordenada X:** Impor nível lógico 1 (3.3V) nos pinos D58 e D60 correspondendo aos eletrodos UL e LL, respectivamente. E nível lógico 0 (0V) nos pinos D57 e D61, correspondendo aos eletrodos UR e LR. Feito isso procede-se uma conversão AD com entrada no pino analógico A5.
- **Coordenada Y:** Impor nível lógico 1 (3.3V) nos pinos D57 e D58 correspondendo aos eletrodos UL e UR, respectivamente. E nível lógico 0 (0V) nos pinos D60 e D61, correspondendo aos eletrodos LL e LR. Feito isso procede-se uma conversão AD com entrada no pino analógico A5. Segue a listagem da função para aquisição da posição corrente da esfera.

Quadro 4 - Código de leitura dos valores dos eixos.

```

//____função getDataTouch : faz a leitura das coordenadas x e y do toque
int getDataTouch()
{
    //lê posição X
    digitalWrite(touchUL, 0); //UL aterrado
    digitalWrite(touchLR, 1); //LR em +3.3V
    delay(4); //aguarda estabilização da tensão antes da leitura

    //Faz a conversão AD e mapeia coordenada X pra origem 0(0,0) no centro da placa
    xPos = map(analogRead(touchSENSE), 267, 714, -225, 225);

    //lê posição Y
    digitalWrite(touchUL, 1); //UL em +3.3V
    digitalWrite(touchLR, 0); //LR aterrado
    delay(4); //aguarda estabilização da tensão antes da leitura

    //Faz a conversão AD e mapeia coordenada Y pra origem 0(0,0) no centro da placa
    yPos = map(analogRead(touchSENSE), 267, 720, -225, 225);
}

```

Fonte: Própria (2019)

A listagem mostra a aplicação da função “map” para mapear as coordenada de tal forma que a origem do sistema cartesiano esteja no centro da placa.

Como o *touchscreen* apresenta uma certa capaciância entre os eletrodos, é necessário uma espera de certa fração de tempo para estabilização da tensão depois que os níveis lógicos são impostos. Assim, foi necessário um intervalo de 4ms até que a conversão AD pudesse ser feita.

Foi utilizada conversão AD com 10 bits de resolução, com a tensão de entrada variando de 0V a 3.3V, assumindo até 1024 níveis discretos.

5.3.2 Filtragem da Entrada

Conforme já mencionado, as telas *touchscreen*, como é característico da grande maioria dos sensores, não estão totalmente livres de falhas, e normalmente apresentam pequenas imprecisões no processo de leitura. Para contornar esse problema foi utilizado um filtro baseado na biblioteca *SimpleKalmanFilter*, de autoria de Denys Sene. A aplicação do filtro removeu as variações bruscas provenientes de ruídos gerados no próprio *touchscreen* e nas conexões até o conversor AD. O traçado digitalizado apresentou aspecto mais suave.

É comum ainda a utilização de um capacitor com valor tipicamente de 10nF entre os terminais do *touchscreen* e o Terra do circuito, configurando um filtro passa baixa, porém, essa técnica requer um maior tempo de espera até a tensão se estabilizar, o que aumenta a constante de tempo do sistema, por isso não foi utilizada aqui.

5.3.3 Processamento do PID

Conforme abordado no referencial teórico, o PID é um método de controle dinâmico composto pela soma das contribuições de três ações distintas: Proporcional, integral e derivativa. A equação (2.3) nos mostra que essa soma varia apenas em função do erro atuante $e(t)$ em cada iteração em tempo discreto. De fato, os termos K_c , $\frac{K_c}{T_i}$ e $K_c T_d$ que são respectivamente o ganho proporcional, integral e derivativo são constantes. Dessa forma temos que nos preocupar apenas com o erro $e(t)$, que pode facilmente ser calculado pela diferença entre o *set point*, já determinado pelo usuário, e a posição corrente da esfera, obtida através da etapa de aquisição dos dados.

Importa considerar que o PID trabalha em malha fechada, conforme a figura 4 do capítulo 2, logo, todos os cálculos avançam dentro de um loop, iteração por iteração, com tempo de duração definida através da variável “sampleTime”, que é o tempo de amostragem do sistema. Assim, podemos notar que a razão $\text{deltaX}/\text{sampleTime}$ é variação de espaço sobre variação de tempo, caracterizando a componente da velocidade da esfera na direção X. Da mesma forma ocorre para a direção Y.

O fragmento de código para o cálculo das principais variáveis do PID é indicado no Quadro 5.

Quadro 5 – Fragmento de código do PID.

```
//calcula o erro atuante
erroX = xPos-setPointX;
erroY = yPos-setPointY;

//calcula a variação do erro na última iteração
deltaX = xPos - xPast;
deltaY = yPos - yPast;

//calcula ação proporcional
proporcionalX = kP * erroX;
proporcionalY = kP * erroY;

//calcula ação integral
integralX += kI * erroX;
integralY += kI * erroY;

//calcula ação derivativa
derivativoX = kD * deltaX/sampleTime;
derivativoY = kD * deltaY/sampleTime;

//saída do PID com a soma das ações
pidX = proporcionalX + integralX + derivativo;
pidY = proporcionalY + integralY + derivativo;
```

Fonte: Própria (2019)

As constantes do K_p , K_i e K_d estabelecem o tipo de resposta dinâmica que se quer imprimir ao sistema. Cuidado especial deve ser tomado para não levar o sistema à instabilidade ou mesmo torná-lo excessivamente lento ou impreciso. O ajuste dessas constantes foi colocado sob o controle do usuário através da interface gráfica, como será mencionado em tópico posterior. Os valores de inicialização das constantes são os seguintes:

5.3.4 Saída para os atuadores

Os atuadores são responsáveis pela condução física da planta ao estado de equilíbrio. Nesse projeto foram implementados na forma de servo motores. Os servos são particularmente atraentes para aplicações de menor porte, sem grandes cargas mecânicas. São práticos e de fácil utilização, por isso foram adotados. O modelo utilizado é o Hitec HS-303.

Quando o sistema atinge o regime permanente, o sistema está em equilíbrio estático e a saída do PID é teoricamente nula. Nessa condição a placa está nivelada, ou seja, sem nenhuma inclinação em relação ao plano horizontal. Nesse instante o braço do servo se encontra na posição de 90 graus, como mostra a Figura 17. Isso requer um trem de pulsos de 1500us. Dessa forma, a saída do PID deve sofrer um desvio de aproximadamente 1500 para que a placa assuma a posição horizontal na condição de saída nula. Essa rotação é alcançada somando as constantes de centralização centerX e centerY às saídas X e Y do PID, respectivamente, conforme mostrado no Quadro 6.

Quadro 6 - Código de saída do PID para os servos.

```
//envia saída do PID para os servos
servoControlX.writeMicroseconds(pidX + centerX);
servoControlY.writeMicroseconds(pidY + centerY);
```

Fonte: Própria (2019)

As constantes somadas contêm valores próximos a 1500 com alguma variação para mais ou para menos, variando de acordo com a necessidade do ajuste fino. Para esse procedimento foram utilizadas outras duas constantes, uma para cada eixo. Elas são constantes de trimagem (ajuste fino) e disciplinam o processo de ajuste (Quadro 7). A expressão “trimagem” foi aqui tomada de empréstimo do segmento de aeromodelismo, onde expressa o ato ou efeito de ajustar para que não sobre inclinações.

Quadro 7 - Constantes de centralização e ajuste fino.

```
//constantes de centralização e ajuste fino
#define centerX 1500 + trimX
#define centerY 1500 + trimY
```

Fonte: Própria (2019)

5.3.5 Filtragem da saída

Para a correta excursão dos servos nos movimentos de inclinação da placa em torno dos eixos x e y, foi necessário ainda que as saídas das ações de controle do PID passassem por um condicionamento para torná-las capazes de cumprir suas tarefas. Esse condicionamento começou pelo ajuste das constantes para que os movimentos tivessem amplitude suficiente para a correta inclinação. Esse ajuste resultou em um problema que exigiu atenção e cuidado especial. Ele amplificou o ruído gerado pelo derivativo, o que resultou em trepidações da placa e instabilidades no controle da esfera.

Para tratar esse problema foi desenvolvido um filtro de média móvel de 15 pontos, ou seja, a leitura considerada é baseada na média aritmética dos 15 últimos valores convertidos,

Testes exaustivos apontaram a quantidade de 15 pontos como um bom limite no *tradeoff* entre a suavização da saída e a precisão temporal no comando enviado aos servos. Valores acima desse resultaram em atraso no processo de controle dinâmico.

No Quadro 8 é indicado o código da função do filtro de média móvel e suas chamadas.

Quadro 8 – Função de implementação do filtro de média móvel.

```
//____função medFilter : calcula e retorna a média móvel dos últimos N
elementos____
double medFilter(int x, int buffer[])
{
    double soma;
    for (byte i = sizeMedFilterBuffer-1; i > 0; i--)
        buffer[i] = buffer[i-1]; //desloca o bloco em 1 elemento para a direita
                                //eliminando o último
    buffer[0] = x;               //insere o novo valor no início do bloco
    soma=0;
    for (byte i=0; i<sizeMedFilterBuffer; i++)
        soma += buffer[i]*1.0; //soma os elementos do bloco
    return soma/sizeMedFilterBuffer; //retorna a média
}

//filtra a saída do PID com filtro média móvel
pidX = medFilter(pidX,medFilterbufferX);
pidY = medFilter(pidY,medFilterbufferY);
```

Fonte: Própria (2019)

5.4 INTERFACE GRÁFICA

Considerando que a plataforma foi desenvolvida com propósito de ser uma ferramenta versátil empregada no estudo da teoria de controle dinâmico e simulações de ordem diversas, foi desenvolvido um sistema de interfaceamento homem-máquina através de interface gráfica

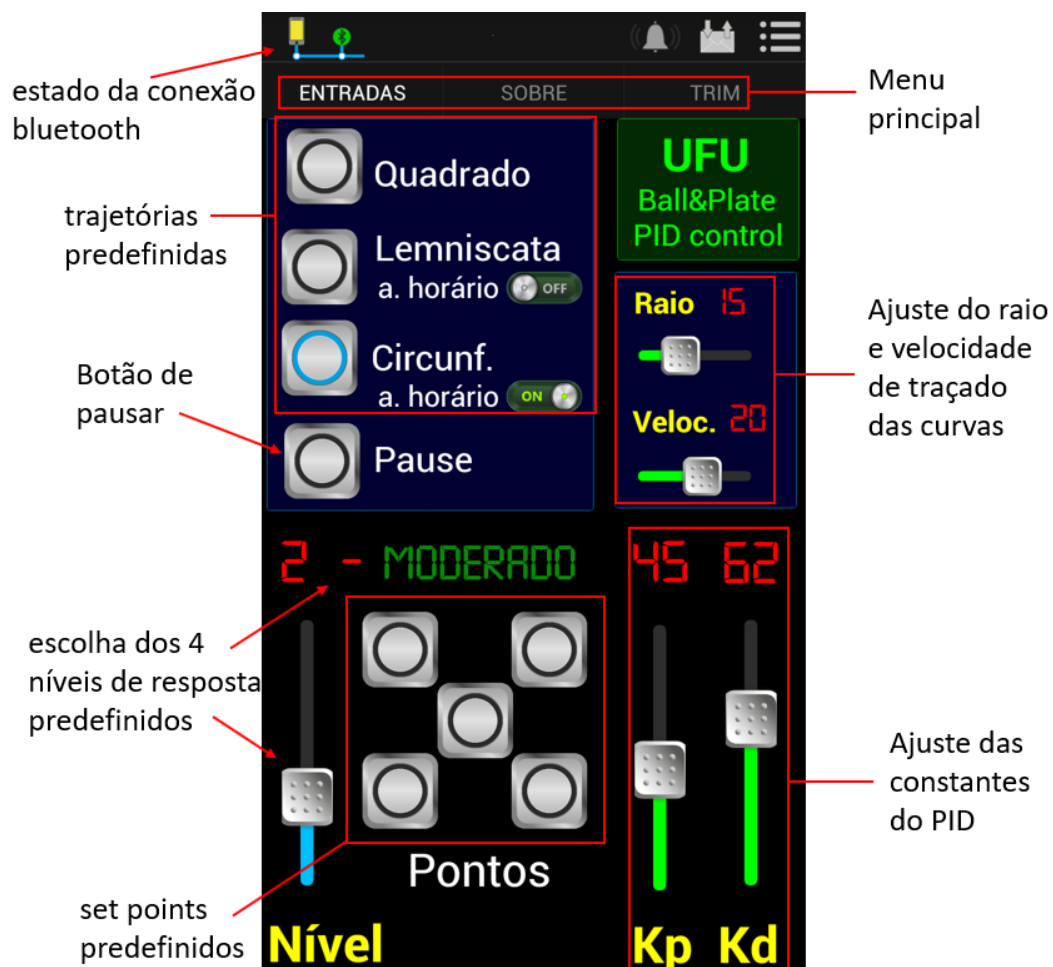
na qual o usuário pode a qualquer momento acessar remotamente a plataforma e alterar seus principais parâmetros.

O controle nas mãos do usuário é estabelecido por meio de um dispositivo móvel podendo ser um smartphone ou tablet dotado de sistema operacional Android. O dispositivo se comunica com a plataforma através de conexão *bluetooth*. Os componentes gráficos da interface assim como o gerenciamento da comunicação com a plataforma foram desenvolvidos por meio do aplicativo *Virtuino*.

O *Virtuino* trabalha na estrutura cliente/servidor permitindo que o lado cliente insira *widgets* como botões, chaves, *sliders*, *leds*, *displays* dentre muitos outros. Para a utilização do *Virtuino* foi necessário fazer a instalação do *app* no dispositivo móvel e de sua biblioteca no computador onde está a IDE de desenvolvimento do software da plataforma.

Essa biblioteca fornece uma classe chamada *virtuinoBluetooth* cuja instância fornece todos os métodos e atributos necessários para a comunicação com a interface remota via conexão *bluetooth*. Figura 38 mostra a tela principal da interface com o usuário.

Figura 38 - Interface do sistema desenvolvida no Virtuino.



Fonte: Própria (2019)

Cada *widget* está associado a uma posição de memória cujo conteúdo pode ser compartilhado entre cliente e servidor, a comunicação é bidirecional. O usuário pode a qualquer momento atuar sobre a atividade da plataforma através desses componentes de controle, que modificam o conteúdo de suas respectivas posições de memória e comunicam o fato à plataforma remota. Assim ele pode mudar parâmetros como as constantes de ajuste do PID, o set point, que pode ser um ponto fixo na placa ou um lugar geométrico como quadrado, circunferência ou uma lemniscata de Bernoulli. A circunferência pode ter seu centro posicionado em qualquer um dos cinco pontos fixos predefinidos conforme mostrados na figura 388. Pode ainda ter seu raio e a velocidade do traçado alterados.

Segue um trecho de código (Quadro 9) onde a central de controle envia os valores de inicialização dos valores de raio e velocidade do traçado de uma circunferência nas posições de memória 12 e 13, respectivamente.

Quadro 9 – Código de inicialização de valores no Virtuino.

```
virtuino.vDigitalMemoryWrite(12,15); //inicializa raio da circunferência
virtuino.vDigitalMemoryWrite(13,30); //inicializa velocidade do traçado
```

Fonte: Própria (2019)

Para auxiliar na exploração dos movimentos foram estabelecidos quatro *presets* contendo diferentes níveis de resposta dinâmica do PID. Esses níveis foram chamados de Suave, Moderado, Intenso e Agressivo. Cada qual com seus respectivos valores das constantes de ganho proporcional e derivativo pré-estabelecidos. O usuário pode ainda fazer seu ajuste particular dessas constantes utilizando *sliders* específicos e à sua disposição na GUI. Por exemplo, a atividade pode ser pausada. Quando o usuário pressiona o botão PAUSE, o Virtuino envia o estado lógico 1 (pressionado) para o servidor através da posição de memória 0 ordenando que a plataforma entre no modo PAUSE. Segue um trecho de código de implementação da função PAUSE, processada na central da plataforma (Quadro 10).

Quadro 10 – Código da função PAUSE.

```
while(virtuino.vDigitalMemoryRead(0))
{
    virtuino.run(); //mantém o servidor Virtuino em atualizado
    servoControlX.writeMicroseconds(centerX); //nivela a placa em X
    servoControlY.writeMicroseconds(centerY); //nivela a placa em Y
}
```

Fonte: Própria (2019)

O código mostra que enquanto a leitura da posição de memória 0 retornar nível lógico 1, o sistema permanece estático com a placa nivelada, ou seja, na posição horizontal. A primeira

linha do bloco *while* informa ao Virtuino para atualizar a leitura de todas as posições de memória.

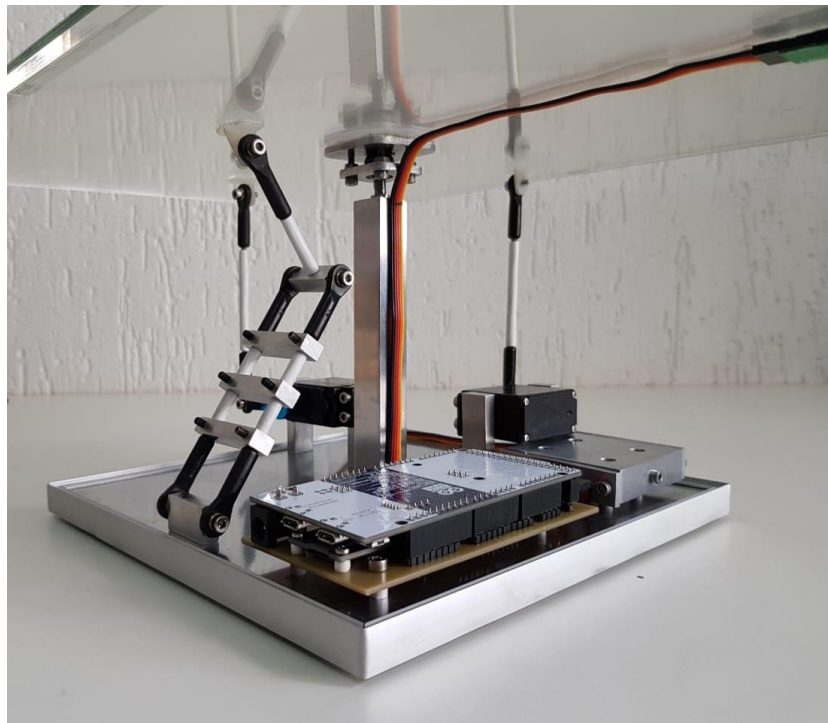
O software na central de controle também monitora constantemente e em tempo real a conexão *Bluetooth* entre GUI e plataforma. Em caso de falha ou ausência da conexão o usuário é imediatamente informado através de uma mensagem de áudio emitida através do *buzzer*.

CAPÍTULO 6

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

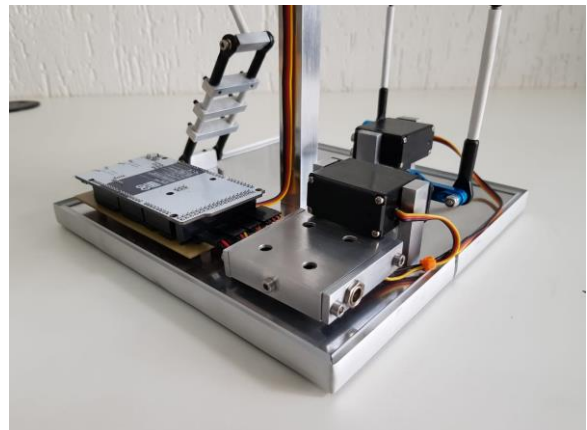
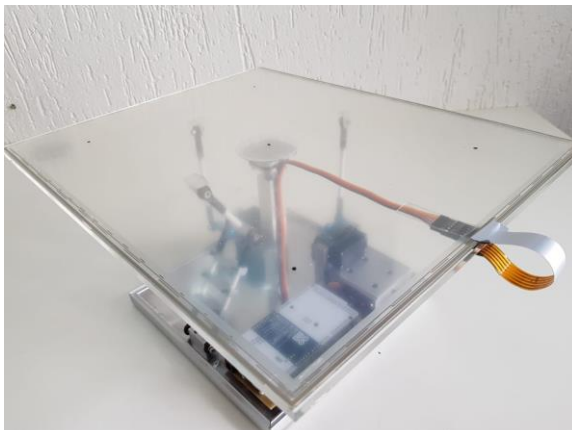
O Aspecto final do protótipo é apresentado na Figura 39 e Figura 40. A transparência do *touchscreen* combinada com o alumínio natural resultou em um visual harmônico e *clean*. As pequenas dimensões físicas favorecem o fácil transporte e utilização. Os únicos acessórios necessários para seu uso são a fonte de alimentação e um dispositivo Android, além da própria esfera.

Figura 39 - Aspecto geral do protótipo, vista inferior.



Fonte: Própria (2019)

Figura 40 - Aspecto geral do protótipo, vista superior e vista da entrada da fonte.



Fonte: Própria (2019)

Nos próximos itens serão discutidos o funcionamento e desempenho do sistema, fazendo um paralelo ao sistema Ball and Plate que utilizava visão computacional.

6.1 OPERAÇÃO E DESEMPENHO DO SISTEMA

Quando a plataforma é ligada, a central de controle aciona o *buzzer* para sinalizar o modo de espera por uma conexão *bluetooth*. Depois de estabelecida a conexão, a central envia os dados de inicialização necessários ao início da atividade, como as constantes do PID e condições iniciais de movimento. Nesse instante é possível observar a atualização de cada um dos *sliders* e valores numéricos associados a eles, conforme mostrado na Figura 38.

A partir desse instante o controle da plataforma está nas mãos do usuário. É requerido certo conhecimento da teoria básica de controle para a operação correta e segura do sistema. Por trás de todo o cenário atuam as leis que regem o seu funcionamento. É necessário ter a ciência de que as entradas do usuário não podem ser arbitrárias, uma vez que podem mudar de forma brusca o comportamento dinâmico tornando o sistema instável, como descrito no Capítulo 2.

Dentro das condições toleráveis de uso o usuário pode por exemplo escolher uma trajetória a ser traçada, como uma circunferência, lemniscata ou quadro. Pode proceder a transição de duas trajetórias ou estacionar em um dos cinco set points prefixados, confirme indicados na Figura 41. Nesses movimentos ele tem a liberdade de atuar sobre as constantes K_p e K_d . Alternativamente ele pode escolher um dos quatro níveis de resposta predefinida, podendo ser Suave, Moderado, Intenso ou Agressivo.

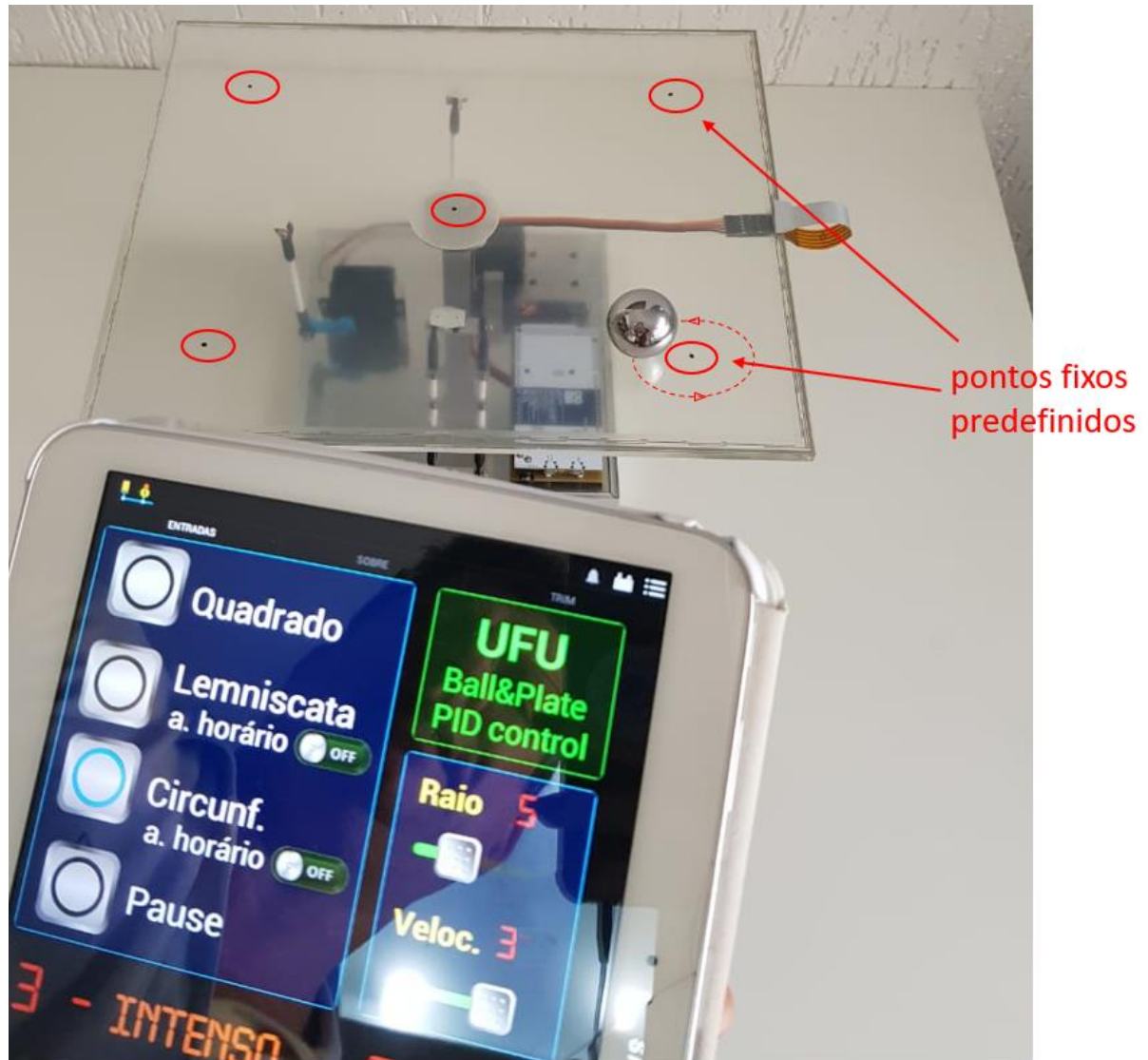
6.1.1 Desempenho

O deslocamento da esfera nas diversas transições assim como seu estacionamento nos *set points* apresentou alto grau de estabilidade, mesmo quando submetido a condições mais críticas de uso. Testes foram realizados adicionando distúrbios gerados manualmente e diretamente sobre a esfera, onde o respondeu de forma robusta rejeitando essas perturbações propositalmente inseridas.

Uma performance particularmente importante na verificação do bom desempenho do sistema foi é o traçado da circunferência em baixa velocidade e pequeno raio tendo seu centro distante do centro da placa, sendo mais próximo de um dos vértices. Esse movimento apresenta

um grau de complexidade bem maior que o traçado de curvas concêntricas com a placa, pois nessa região as vibrações e ruídos mecânicos tendem a ser maiores.

Figura 41 - Performance de traçado orbitando um dos 5 pontos fixos predefinidos

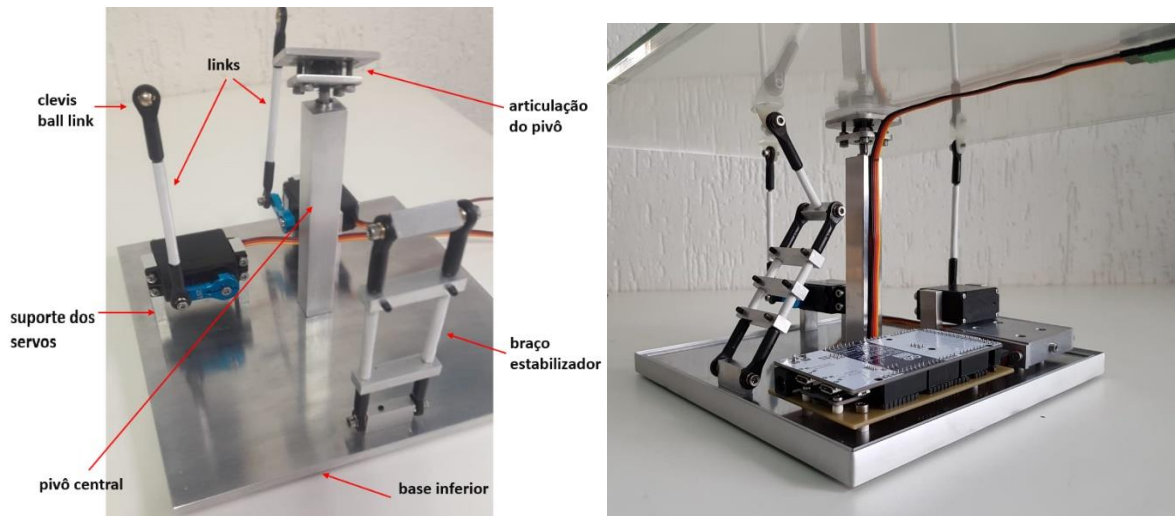


Fonte: Própria (2019)

O protótipo apresentou notável precisão na execução dessa tarefa, mostrando que os filtros de Kalman e média móvel prestaram um grande serviço.

Inicialmente a placa apresentou um pequeno deslocamento angular em torno do eixo Z. Um movimento de giro em torno desse eixo quando da operação normal do sistema. Foi então observado um pequeno movimento de torção ao longo do braço mecânico estabilizador. Esse fato sinalizou a necessidade de reforço através da instalação de uma terceira barra de travamento no centro do braço, o que resolveu o problema. Essa modificação pode ser observada pelas diferenças nas Figura 29 e Figura 39, rerepresentadas na Figura 42.

Figura 42 - Correção da efeito de torção do protótipo.



Fonte: Própria (2019)

6.1.2 Integrador nulo

Uma questão que chama atenção diz respeito à real contribuição da ação integral para o bom desempenho do sistema. Testes exaustivos apontaram para um valor nulo da constante integral K_i , tornando nula a saída do integrador.

Verificou-se já a partir dos primeiros testes que quando o sistema se aproxima das vizinhanças do set point, permanecendo próximo ao regime permanente e o integrador iniciando a soma dos desvios a fim de gerar ações de controle para zerar o erro atuante, ocorre que o atrito estático se opõe ao deslocamento da esfera. No instante em que a energia armazenada no integrador se torna suficientemente alta, a componente do peso da esfera na direção do plano do prato vence o atrito estático.

A partir desse momento o atrito passa a ser de rolamento, cujo módulo é inferior ao do atrito estático. Isso faz com que a esfera se mova rapidamente armazenando energia cinética e se afastando do set point. Nesse momento as ações proporcional e derivativa agem no sentido de reconduzir a bola de volta às vizinhanças do regime permanente, e assim o ciclo vicioso se reinicia. O fato observado aponta para a não utilização do integrador para esse sistema, cabendo novos estudos sobre a questão.

6.2 FUNÇÕES ADICIONAIS

O *Ball and Plate* é sensível à inclinação da sua base. A equação (2.8) na modelagem matemática do sistema considera que a força gravitacional g é sempre perpendicular à sua base.

Quando sustentado por mesas e pisos desnivelados, esse ângulo diverge de 90 graus. Isso faz com que os *set points* fiquem deslocados de sua posição original.

Para resolver esse desajuste foi integrado ao sistema um sensor acelerômetro capaz detectar o desnivelamento e informar a central de controle para que esta faça a compensação de forma automática.

Além desse sistema de correção automático, que ocorre de forma alheia ao usuário, um sistema de correção manual também foi implementado. Sua tela é mostrada na Figura 43. Ele é dotado de dois *sliders* para ajuste manual nos dois eixos do plano XY. Esse sistema de ajuste foi localizado dentro da malha do PID para que tenha efeito em tempo real, ou seja, o usuário pode acompanhar o ajuste através do deslocamento da esfera em direção ao set point.

Figura 43 - Tela do sistema de trimagem manual.



Fonte: Própria (2019)

Uma outra funcionalidade implementada foi a possibilidade de persistência dos dados gerais da plataforma. Através do módulo leitor/gravador SD CARD os dados podem ser salvos para próximas utilizações, quando então podem ser recuperados.

6.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE DETECÇÃO POR VISÃO COMPUTACIONAL E *TOUCHSCREEN*

Esse trabalho foi desenvolvido considerando a hipótese de que o método de detecção do movimento da esfera por meio de *touchscreen* é mais preciso, mais simples e mais fiel no registro do deslocamento da esfera, tendo como comparação a versão anteriormente desenvolvida de um sistema *Ball and Plate* com sensoramento por visão computacional utilizando câmera de vídeo.

Acreditou-se por isso que o desempenho do sistema de controle é mais estável e com uma melhor resposta a perturbações do que o mesmo sistema utilizando visão computacional.

Baseado nos estudos e experiências diversas dentro dos dois métodos, observou-se que o método de detecção por *touchscreen* ofereceu um melhor desempenho quando comparado com o método por visão computacional pelas seguintes razões listadas abaixo.

a) Custo computacional

- **Visão computacional:** Requer aplicação de processamento digital de imagens frame por frame para detecção e rastreamento da esfera, o que demanda mais memória e poder de processamento do hardware.
- ***Touchscreen*:** Para a detecção e rastreamento é necessário apenas a conversão AD das tensões entregues pelo *touchscreen*. Essa conversão é feita diretamente pelo microcontrolador em uma tarefa simples. Não requer um computador dotado de sistema operacional.

b) Taxa de amostragem

- **Visão computacional:** A frequência de captura das câmeras tipicamente é de 30FPS, ou seja, apenas 30 pontos por segundo. Acima dessa taxa as câmeras se tornam caras e o processamento lento para ser em tempo real.
- ***Touchscreen*:** O tempo de amostragem é significativamente pequeno, não precisa percorrer longos vetores já que a informação de posição é obtida lendo a malha resistiva de saída do *touchscreen*. O que permite alta velocidade de conversão e pelo menos 150 pontos por segundo.

c) Perturbações externas

- **Visão computacional:** Muito sensível a variações das condições de iluminação ambiente. Como essas são sujeitas a mudanças, a de detecção e rastreamento também estão. O sistema é intolerante à condição de iluminação excessiva bem como iluminação insuficiente. O bom funcionamento fica condicionado e dependente dessa propriedade.
- **Touchscreen:** Total insensibilidade e independência à variação de luz. Funciona até mesmo na escuridão total.

d) Perturbações exercidas por partes do próprio sistema

- **Visão computacional:** A câmera precisa ser fixada em posição estratégica sobre o centro da placa em certa altura. Se utiliza um suporte mecânico que se torna passível de vibrações que prejudicam a detecção, além de serem um estorvo para transportar e ajustar sua correta posição. Além disso, frequentemente ocorre o vazamento de imagem do plano inferior à placa. Quando a placa se inclina, a área “vista” pela câmera se torna menor, o que faz com que o plano inferior à placa apareça na imagem, o que pode interferir na detecção e rastreamento.
- **Touchscreen:** Não requer suporte mecânico suscetível a perturbações. O método dispensa o uso de qualquer acessório externo para a detecção e não requer ajustes de ordem mecânica no sensor.

Podemos concluir, portanto, que o método de detecção por *touchscreen* apresenta-se como uma forma mais robusta, fiel e precisa no registro do deslocamento da esfera. Ela oferece notável robustez por tolerar condições mais adversas dentro do seu ambiente de funcionamento. Esse comportamento mantém uma relação mais fiel com o propósito assumindo no início desse estudo, quando pretendeu-se desenvolver um dispositivo confiável, prático e de fácil utilização para atender a requisitos didáticos de aprendizagem, estudos, simulações e testes.

CAPÍTULO 7

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como tema a construção de um protótipo de um sistema *Ball and Plate*, onde procurou-se melhorar diversos aspectos de desempenho e de uso em relação ao protótipo desenvolvido anteriormente com visão computacional. A principal meta do trabalho é ter um protótipo funcional, compacto e versátil, visando o uso no ensino da teoria de controle dinâmico. Ao longo do trabalho, foram descritos os principais conceitos teóricos referente ao protótipo no Capítulo 2, a modelagem matemática de um sistema *Ball and Plate* foi descrita no Capítulo 3, a lista de materiais e as etapas de desenvolvimento no Capítulo 4. No Capítulo 5, as etapas de construção do protótipo foram descritas passo a passo, de forma a facilitar a reprodução do projeto por terceiros. No Capítulo 6, foi apresentada uma breve discussão das características do sistema em relação a sua versão anterior ao ter colocado o sistema em operação.

Os resultados em todas as etapas de desenvolvimento apontam que o objetivo desse estudo foi alcançado com êxito. As discussões teóricas forneceram valioso suporte para o estabelecimento de um modelo matemático de fato representativo do sistema construído.

Nenhuma linearização grosseira foi adotada no processo de modelagem com vista na fidelidade do resultado final. A simulação do modelo obtido apresentou características necessárias e suficientes para assegurar os requisitos de desempenho idealizados na véspera.

A plataforma construída apresentou boa performance na atuação do seu controlador PID, além de sua elegância visual juntamente com sua interface gráfica. Funcionalidades adicionais foram agregadas como sugestões de soluções e desenvolvimento para outros projetistas.

Como trabalhos futuros, sugere-se a comparação de diferentes técnicas de controle no sistema, com utilização do PID e realizar a comparação dos resultados. Também é possível utilizar a plataforma para fins além do ensino, como o uso no entretenimento com um ringue de competição ou jogo didático, onde um robô precise remover a esfera da plataforma ou realizar uma certa trajetória.

Em relação as características do sistema, é possível melhorar a interface do Virtuino para exibir mais informações, como a posição em tempo real da bola por exemplo. A auto regulagem da inclinação da mesa também é possível com a adição de um sensor inercial ou um

giroscópio na base da plataforma. Também é possível adicionar uma proteção em volta da plataforma, para que nos casos de instabilidade, a esfera não seja lançada diretamente ao chão.

Ao considerar sistemas derivados e semelhantes a plataforma, pode-se considerar o mesmo processo de elaboração para um sistema que faz uma bola de pingue-pongue quicar na plataforma, usando como sensoriamento a eco localização e determinar se é possível usar o *touchscreen* para esferas leves. Outros sistemas mais simples, em 2D também podem ser elaborados, sejam pelo controle mecânico de inclinação ou por levitação eletromagnética.

Assim, esse trabalho é aqui concluído com o sentimento de que poderá ser valioso para aqueles que se interessam pelo estudo da teoria de controle dinâmico e desejam projetar e construir seus próprios dispositivos. Guardo a esperança de que gerações futuras possam estudá-lo e melhorá-lo, fazendo dele uma peça ou chave a ser aplicada na construção de algo verdadeiramente útil para o bem-estar das pessoas.

REFERÊNCIAS

- ALMUKHTABAR-X, (2018) **Ball on Plate PID controller with Arduino**. [Online] Disponível em: www.youtube.com/watch?v=0BDvbljP4Yk. [Acesso em 11 2018]
- ALI, E. et al. (2015) **AU Ball on Plate Balancing Robot**. Proceedings of the 2015, IEEE Conference on Robotics and Biomimetics, Zhuhai, China, December 6-9, 2015
- ARAUJO, D. H. C. d.; H. F. Canova e I. B. Souza (2016) **Modelagem e implementação de um sistema *Ball and Plate***, ResearchGate, junho 2016.
- ARDUINO (2018). [Online]. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-due>. [Acesso em 11 2018].
- AWTAR, S. e K. C. Craig. (2018) **Mechatronic Design of a Ball On Plate Balancing System**, Department of Mechanical Engineering, Aeronautical Engineering and Mechanics Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY12180, USA.
- BENNETT, S. (1984) **Nicolas Minorsky and the automatic steering of ships**, IEEE, pp. 10-15, Novembro 1984.
- BIAZETTO, P. H. F. (2017) **Implementação De Técnicas De Controle De Posição Angular Em Um Pêndulo Invertido Rotacional**, TCC de Eng. de Controle e Automação, UNICESUMAR.
- CAMPOS, W. F. et al (2016) **Projeto de planta química didática para desenvolvimento de diferentes estratégias de controle de processos e automação industrial**, dissertação de mestrado, UNICAMP.
- CASTRO, R. d. S. J. M. O. Barth, J. V. Flores e A. T. Salton (2016), **Modelagem E Implementação De Um Sistema *Ball and Plate* Controlado Por Servo-Visão**.
- DAS, Arindam et al. (2016) **Improved Performance of Cascaded Fractional-Order SMC over Cascaded SMC for Position Control of a *Ball and Plate* System**, Department of Electrical Engineering, NIT Silchar, Silchar, India, IETE JOURNAL OF RESEARCH, 2016.
- Do Bit ao Byte** (2018), [Online]. Disponível em il.wp.com/www.dobitaobyte.com.br/wp-content/uploads/2014/07/servo.jpg. [Acesso em 12 2018]
- DOWNS, R. (2005), **Using Resistive Touch Screens For Human/Machine Interface**, Texas Instruments Incorporated, 2005. Online Disponível em : www.ti.com/jp/lit/an/slyt209a/slyt209a.pdf. [Acesso em 11 2018].
- DUŠEK, František. Et al. (2017) **Modelling of *Ball and Plate* System Based on First Principle**, Model and Optimal Control 2017, 21st International Conference on Process Control (PC) June 6–9, 2017, Štrbské Pleso, Slovakia
- FRANKLIN; F., D. Powell e A. Emami-Nacini (2013) **Sistemas de Controle para Engenheiros**, Porto Alegre: Bookman, 2013.
- GARBIN, N. L. S. (2018) **Análise Da Resposta Dinâmica De Um Sistema Mecânico Com Amortecedor De Massa Passivo: Um Estudo Experimental E Numérico**, dissertação de mestrado, UTFPR.

- HAGGLUND, K. J. e T. Anstron. (1995) **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**, Instrument Society of America, 1995.
- HALLIDAY, D. (2014) **Fundamentos de física**, Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- HAM, D. C. e M. M. Taufiq. (2015) **Development of a Ball and Plate System**, American Society For Engineering Education, p. 5, 14 - 17 06 2015.
- HUGUENIN, R. C. (2014) **Projeto de Controle de Equilíbrio e Construção de um Protótipo de um Robô Móvel Baseado no Modelo de um Pêndulo Invertido**. TCC em Eng. de Controle e Automação, IFF, Campos dos Goytacazes, RJ.
- KASSEM, Aghiad. Et al. (2015) **Commparation Between Different Methods of Control of Ball and Plate System with 6DOF Stewart Platform**, International Federation of Automatic Control. 10.1016/j.ifacol.2015.09.158, IFAC-PapersOnLine 48-11 (2015) 047–052
- KRITHIKAA, M. (2016) **Touch Screen Technology - A Review**, *International Journal of Trend in Research and Development*,, 2016.
- MELO, M.A.A.; Strohl, C.E.; Eisencraft, M. (2005) **Ensino de sistemas de controle usando aplicações reais em engenharia elétrica**. XXXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Campina Grande, Setembro de 2005.
- MICROCHIP TECHNOLOGY; Microchip Technology (2007) Application Note AVR341
- MORALES, L. et al. (2017) **A Sliding-Mode Controller from a Reduced System Model: Ball and Plate System Experimental Application**, Departamento de Automatización y Control Industrial, Escuela Politécnica Nacional Ladrón de Guevara, DOI: 10.5220/0006425905900597
- MUJADIN, A. et al. (2017) **High Precession Resistive Touch Screen Driver Circuitry for Ball on Plate Balancing Systems**, 2017 International Symposium on Electronics and Smart Devices
- NISE, N. (2012) **Engenharia de Sistemas de Controle**, Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- OGATA, K. (2011) **Engenharia de Controle Moderno**, São Paulo: Pearson, 2010.
- OLIVEIRA, V. , M. Aguiar e J. Vargas. (2016) **Engenharia de Controle**, Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.
- PENEDO, S. R. M. (2014) **Sistemas de Controle**, ÉRICA, 2014
- SERVO MOTOR (2013) **Servo Motor**, Universidade Estadual Paulista, UNESP, 2013. [Online]. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula-4---servo-motor-13-03-2013-final.pdf>>, acesso em 2018.
- SILVA, F. R. d. e B. d. S. R. Neto. (2001) **Modelagem e Análise de Sistemas Dinâmicos**, Rio de Janeiro, 2001.
- SILVA, G. B. M., (2015). **Modelagem do Kit de Levitação Magnética em Espaço de Estados. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica**, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF

STEVEN, S. W. (1999). **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing.**, 2nd ed, California Technical Publishing San Diego, California.

TOUCH SCREEN MUSEUM, (2018), Touch Screen Museum, DMC CO. LTD, 2018. [Online]. Available: <https://www.dmccoltd.com/english/museum/touchscreens/>. [Acesso em 2018].

ZANCO, W. S., (2006), **Microcontroladores PIC: Técnicas de Software e Hardware para Circuitos Eletrônicos**, Érica, 2006

ANEXOS

Software de simulação do sistema *Ball and Plate* em malha aberta

```
clc; close all; clear all;
g = -9.81; % Aceleração da gravidade
L = 0.075; % distância do centro ao link do servo
d = .02; % comprimento do braço do servo
s = tf('s'); %define a função de transferência na variável s
posicao = -5*g*d/(7*L*s^2);
subplot(2,1,1); pzmap(posicao); %traça o mapa de polos e zeros
subplot(2,1,2); step(posicao); %traçaresposta a um degrau
```

Software de simulação do sistema *Ball and Plate* em malha fechada (com controlador PID)

```
clc; close all; clear all;
g = -9.81; % Aceleração da gravidade
L = 0.075; % distância do centro ao link do servo
d = .02; % comprimento do braço do servo
s = tf ( 's' ); %define a função de transferência em s
posicao = -5*g*d/(7*L*s^2); %posição
Kp = 8; %constante proporcional
Ki = 0; %constante integral
Kd = 2; %constante derivativa
PID = pid(Kp,Ki,Kd); %Calculo do PID (com integrador nulo)
realimentacao = feedback(PID*posicao,1) %Aplica a saída à
entrada em malha fechada
setpoint = 10; %ponto de referência
subplot(2,1,1); pzmap(realimentacao); %mapa de polos e zeros
subplot(2,1,2); step(setpoint*realimentacao); %resposta à um
dado set point
```