



Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Engenharia Aeroespacial, Eletrônica, Energia, Software

**Bancada Didática para Princípios de Controle:  
Controlador Interativo para Elevação de  
Plataforma por Impulsão Eólica.**

**Autores: Grupo A - Turma D**

**Orientador: Profs. Drs. Diogo C. Garcia e Mariana C. B. Matias**

**Brasília, DF**

**2019**





Grupo A - Turma D

**Bancada Didática para Princípios de Controle:  
Controlador Interativo para Elevação de Plataforma por  
Impulsão Eólica.**

Documento referente ao Ponto de Controle  
3 da disciplina de Projeto Integrador 1, da  
Universidade de Brasília.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Profs. Drs. Diogo C. Garcia e Mariana C. B. Matias

Coorientador: Profs. Drs. Artur Bertoldi, Carla Anflor, Paula Meyer e  
Ricardo Ajax

Brasília, DF

2019

# Resumo

Este documento é o relatório de projeto realizado na matéria projeto integrador para engenharias realizada no período 1/2019. O projeto desenvolvido tem o objetivo de fornecer experiências práticas aos alunos da Universidade de Brasília, da Faculdade do Gama, na matéria de Princípios de controle, por meio da utilização de um sistema didático de um elevador que seja controlado por meio da impulsão por vento, onde o aluno poderá alterar os parâmetros do controlador, alterando a resposta do sistema e verificar seus efeitos no sistema real.

**Palavras-chaves:** Educação para Engenharia; Sistemas de Controle; Bancada Didática.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo simplificado de um Sistema de Controle. . . . .	10
Figura 2 – Diagrama de Blocos de um sistema em malha fechada. . . . .	10
Figura 3 – Diagrama de blocos do projeto. . . . .	12
Figura 4 – Diagrama de blocos de sistema com controlador PID. . . . .	13
Figura 5 – Diagrama de blocos do projeto, com atuação de Processamento de Sinais. . . . .	14
Figura 6 – Exemplo PWM . . . . .	15
Figura 7 – Funcionamento das Requisições.(DOHMS, 2018) . . . . .	17
Figura 8 – Modelo Virtual da Estrutura. . . . .	21
Figura 9 – Tabela de Preço de Sensores de Distância . . . . .	21
Figura 10 – Pinagem ESP32. . . . .	22
Figura 11 – Circuito de potência para o controle do motor . . . . .	23
Figura 12 – Erro de precisão do sensor. . . . .	29
Figura 13 – PDF gerado pela Página Web. . . . .	30
Figura 14 – Realização de teste com o PWM. . . . .	31
Figura 15 – Estrutura Finalizada. . . . .	33
Figura 16 – Estrutura Analítica de Projetos. . . . .	41
Figura 17 – Esquemático do circuito implementado. . . . .	43

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de custos de aquisição . . . . .	25
Tabela 2 – Tabela de Riscos . . . . .	27

# Lista de abreviaturas e siglas

ABS	Anti-lock Braking System
UnB	Universidade de Brasília
FGA	Faculdade Gama
PID	Proporcional Integral Derivativo
PI	Proporcional Integrativo
PD	Proporcional Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
HTML	HyperText Markup Language
RF	Requisito Funcional
RNF	Requisito Não Funcional
MDF	Medium-Density Fiberboard
MDP	Medium-Density Particleboard
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EPS	Poliestireno Expandido
EPP	Polipropileno expandido
IR	Infravermelho
GPIO	General Porpouse IN/OUT
I2C	Inter-Integrated Circuit
AJAX	Asynchronous JavaScript And XML
EMA	Exponential Moving Average
PDF	Portable Document Format

WiFi	Wireless Fidelity
IR	Infra-red
IDE	Integrated Development Environment
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
A/D	Analogic to Digital
MISO	Multiple input, single output



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>Descrição</b>	<b>10</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativas</b>	<b>10</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>11</b>
1.3.1	Gerais	11
1.3.2	Específicos	12
<b>1.4</b>	<b>Referencial Teórico</b>	<b>12</b>
1.4.1	Subárea: Modelagem matemática	12
1.4.2	Subárea: Alimentação	13
1.4.3	Subárea: Processamento de Sinais	14
1.4.3.1	Dispositivo para PWM	14
1.4.4	Subárea: Estrutura	15
1.4.5	Subárea: Sensoriamento	16
1.4.6	Subárea: Servidor WEB	16
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Metodologia</b>	<b>19</b>
2.1.1	Equipes e Partes Interessadas	19
2.1.1.1	Equipe	19
2.1.1.2	Usuários	20
2.1.1.3	Clientes	20
2.1.2	Materiais, equipamentos e aplicações	20
2.1.2.1	Estrutura	20
2.1.2.2	Sensor	21
2.1.2.3	Microcontrolador	22
2.1.3	Sub-sistemas e Algoritmos	23
2.1.3.1	Circuito de Alimentação	23
2.1.3.2	Aquisição de Parâmetros de Entrada	23
2.1.3.2.1	Implementação	24
2.1.3.3	Servidor e Página WEB	24
2.1.3.4	Modelagem Matemática	24
2.1.4	Análise de Custos	25
2.1.4.1	Custo de aquisição	25
<b>2.2</b>	<b>Requisitos</b>	<b>26</b>
2.2.1	Requisitos Funcionais	26

---

2.2.2	Requisitos Não-Funcionais . . . . .	26
2.3	<b>Análise de Riscos . . . . .</b>	<b>26</b>
2.4	<b>Cronograma e marcos . . . . .</b>	<b>26</b>
3	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>29</b>
3.1	<b>Sensoriamento . . . . .</b>	<b>29</b>
3.2	<b>Servidor e página Web . . . . .</b>	<b>30</b>
3.3	<b>Integração do Hardware . . . . .</b>	<b>30</b>
3.3.1	Saída PWM . . . . .	31
3.3.2	Estrutura . . . . .	31
3.4	<b>Modelagem Matemática . . . . .</b>	<b>33</b>
4	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>37</b>
4.1	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>39</b>
	<b>APÊNDICE A – ESTRUTURA ANALÍTICA DE PROJETOS . . . .</b>	<b>41</b>
	<b>APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO CIRCUITOS . . . . .</b>	<b>43</b>

# 1 Introdução

Sistemas de controle estão presentes em inúmeras aplicações na sociedade moderna: Chuveiros eletrônicos, geladeira, freio ABS, controle de estabilidade, controle de altitude de satélites, controle de órbita, placas fotovoltaicas que seguem a posição do Sol, entre outros. Tendo em vista as aplicações desta área de conhecimento, a disciplina de Sistema de Controle é ministrada na Graduação de diversas Engenharias, visando que os estudantes obtenham os conhecimentos fundamentais da área.

Na Universidade de Brasília, UnB, campus Faculdade do Gama, FGA, as disciplinas de Sistemas de Controle e Princípios de Controle são ministradas para os cursos de Engenharia Aeroespacial e Eletrônica e Sistemas de Controle Automotivos para Engenharia Automotiva, com o objetivo de propiciar as primeiras ferramentas para a análise e síntese de sistemas de controle automáticos, existe ainda a disciplina de Projeto de Sistemas de Controle, que busca aprofundar os conhecimentos obtidos nas anteriores.

O conceito de sistema de controle para a Engenharia é definido como um conjunto de subsistemas e processos projetados com o objetivo de obter a saída desejada com um desempenho estabelecido por meio da manipulação da entrada, com pouca ou nenhuma intervenção humana.

Quando se trata de um projeto de um sistema de controle duas das medidas de desempenho são evidenciadas: a resposta transitória e o erro em regime permanente. Por exemplo: um elevador deve subir e descer os andares de forma que não perturbe o passageiro e ao mesmo tempo não demore muito tempo para chegar no andar desejado (resposta transitória e tempo de subida), enquanto que ao chegar no andar desejado, o elevador deve ainda estar nivelado com o piso o suficiente para não ter nenhum potencial de ser nocivo ao passageiro (erro em regime).

Algumas definições: (OGATA, 2011)

- Plantas: Uma é um conjunto de componentes que agem de maneira integrada para a realização de uma determinada tarefa. É aquilo que deve ser controlado
- Variável controlada: É a grandeza ou a condição aferida e controlada.
- Sinal de controle: É a grandeza modificada pelo controlador, buscando modificar o valor da variável controlada.

O sistema da Figura 1, é denominado de malha aberta, sua construção é mais simples, mais barata e mais conveniente para sistemas com saídas de difícil acesso, se comparado ao sistema de malha fechada, Figura 2, já esse por ter realimentação consegue

suprir as desvantagens de um sistema de malha aberta, sendo viável para sistemas instáveis e compensando o efeito de perturbações com a comparação entre saída e sinal de referência.

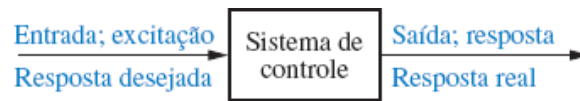


Figura 1 – Exemplo simplificado de um Sistema de Controle.

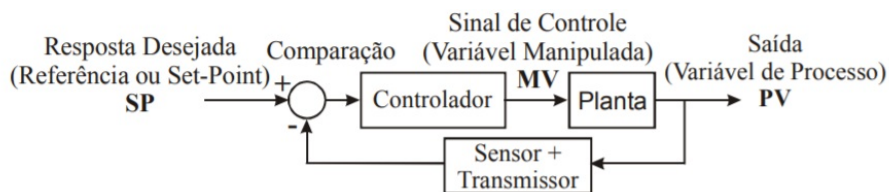


Figura 2 – Diagrama de Blocos de um sistema em malha fechada.

## 1.1 Descrição

O projeto consiste em um modelo de um sistema de controle de um elevador impulsionado por vento. Através da alteração da velocidade do ar, será controlada a altura de uma plataforma, sendo regida pela alternância de constantes de controle, realizada pelos alunos, será possível ter uma resposta imediata e visual às variações impostas pelo sistema de controle.

## 1.2 Justificativas

Perante o tema proposto relacionado a “Ensino para Engenharia” com ênfase para os alunos de engenharia da Faculdade Gama - UnB, foi discutido quais disciplinas possuem uma carência em relação a formas práticas e didáticas de ensino.

Tendo em vista a disciplina de Sistemas de Controle, que teve a sua quantidade de créditos ampliada, sendo substituída por Princípios de Controle, no intuito de oferecer aulas práticas, que possuem algumas características pouco exploradas ou ainda inexistentes em aulas teóricas, tais como a percepção das diferenças entre simulação e aplicação real e a capacidade de despertar uma habilidade criativa e de gerar conhecimentos práticos e aplicáveis à indústria, o que, por sua vez, se torna cada vez mais necessário no mercado de trabalho.(MARCOS, 2005)

Porém o laboratório ainda se encontra com material escasso, desprovido de bancadas de ensino o que impossibilita a validação prática dos conceitos teóricos aprendidos

em sala de aula, sendo a prática realizada unicamente com simulações computacionais. Usualmente, as atividades práticas desta disciplina buscam que o aluno desenvolva controladores para plantas já existentes, buscando analisar a diferença de desempenho ao adicionar controladores, alterando-se os coeficientes e tipo de controlador ou simplesmente fechando a malha do sistema, por exemplo.

A ementa da disciplina de Controle Dinâmico, com a ementa teórica bastante parecida com a ementa de Sistemas de Controle, ministrada na UnB campus Darcy Ribeiro comprova:

- Implementação de Controladores Analógicos: Realização de controladores analógicos utilizando amplificadores operacionais.
- Controle Dinâmico de Sistemas Físicos em laboratório: Controle de processos físicos por compensação dinâmica com controladores projetados no domínio-s, no domínio-w. Controladores PID. Controle de processos físicos por realimentação de estado.
- Métodos Computacionais em Controle Dinâmico: Aplicação de métodos computacionais no controle dinâmico de sistemas lineares contínuos no tempo.
- Experiências Demonstrativas: Servomecanismo Posicionado com Controle Lógico e Sensor Óptico/Digital. Automação de Testes e Medidas no Laboratório de Controle Servomecanismos Especiais.

Diante disso foi decidido pelo grupo a ideia de construir um modelo prático que explore o conceito de controladores PID (Proporcional Integral Derivativo), conteúdo este que agrega bastante valor aos alunos devido ao fato de que possui inúmeras aplicações na indústria. Desse modo é esperado que este modelo sirva como forma de incentivo e aprendizado para os alunos. Com o intuito de que, após o término do projeto, este modelo servirá como bancada de ensino. Sendo utilizado para exemplificações e estudos para as disciplinas de Controle da FGA.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Gerais

De acordo com SENAI : “todo projeto deve possuir objetivos que justifiquem a sua existência e que sirvam de norte para os trabalhos que serão desenvolvidos”.(SILVA; CIM, 2012)

Sendo assim este trabalho tem como objetivos o aprimoramento da matéria de sistemas de controle/princípios de controle no que se diz respeito à experiência laboratorial.

### 1.3.2 Específicos

Para alcançar tais resultados construiremos uma planta de sistema de controle com os parâmetros do controlador PID editáveis para que, após a realização dos cálculos, possa-se ver na prática o resultado do controlador num sistema real.

## 1.4 Referencial Teórico

### 1.4.1 Subárea: Modelagem matemática

Diante da solução proposta de construir uma bancada para auxiliar o entendimento dos alunos em sistemas de controle, tem-se um dos principais desafios a modelagem matemática. Esta, por sua vez, tem a principal função de traduzir o sistema real para um sistema matemático de equações, onde será possível trabalhar a teoria de sistemas de controle.

Para tanto, montou-se o esquemático mostrado na Fig. (3). Foi traçada tal estratégia baseada na teoria de sistemas de controle, onde uma malha fechada é utilizada para realimentar informação no sistema, proporcionando uma melhor resposta para a variável desejada. A principal tarefa da equipe será desenvolver o controlador PID capaz de con-

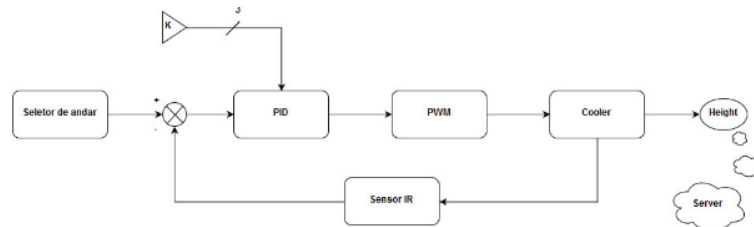


Figura 3 – Diagrama de blocos do projeto.

trolar a altura da plataforma alterando a intensidade com a qual o PWM alimentará a ventoinha.

Visando atender às matérias beneficiadas da melhor maneira possível, optou-se por implementar um controlador PID, devido sua composição, como o próprio nome sugere, ele é a junção de um Controlador Proporcional, um Controlador Proporcional Integrativo (PI) e um Controlador Proporcional Derivativo (PD).

Devido à combinação dessas técnicas de projeto, o PID proporciona uma melhoria no erro em regime permanente e na resposta transitória independentemente. Basicamente, melhoramos a resposta transitória utilizando um PD. Então melhoramos o erro em regime permanente desse sistema compensado aplicando um PI. Uma desvantagem dessa abordagem é a pequena redução na velocidade da resposta quando o erro em regime é melhorado(NISE, 2017).

De maneira geral, um controlador PID tem sua função de transferência (domínio de Laplace) descrita na Eq. (1.1).

$$G_c(s) = K_1 + \frac{K_2}{s} + K_3 \cdot s \quad (1.1)$$

E de forma esquemática, um controlador PID sendo utilizado em um sistema em malha fechada pode ser representado como na Fig. (4):

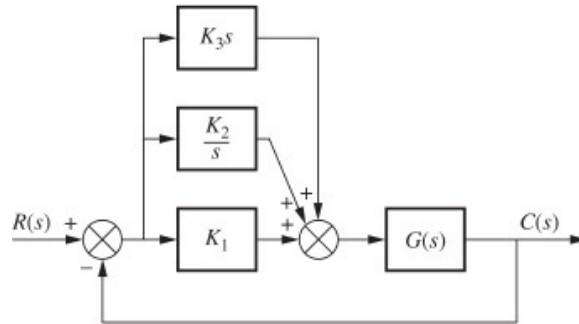


Figura 4 – Diagrama de blocos de sistema com controlador PID.

Diante do esquemático, podemos notar que, se desejado, podemos zerar duas das constantes de proporcionalidade para que seja utilizado somente um dos controladores, por exemplo, o que torna a bancada versátil para diversos experimentos no laboratório, permitindo que os alunos notem a diferença da influência de cada tipo de controlador citado acima.

Ao alterar os K's, baseados na teoria, os alunos poderão projetar Compensadores de Avanço e Atraso de Fase, que, dentre os conceitos utilizados para sua implementação, abrangem grande parte dos assuntos abordados na matéria de Sistemas de Controle, se mostrando um experimento interessante para ser desenvolvido ao longo da disciplina.

### 1.4.2 Subárea: Alimentação

A subárea de alimentação surgiu para suprir uma necessidade do nosso projeto, na qual temos que fornecer energia para os componentes pré requisitados pelas outras áreas. Fontes de alimentação são circuitos capazes de fornecer uma tensão. Portanto, são dispositivos reais que possuem o intuito de garantir uma melhor qualidade de operação do circuito que a utiliza.

Para alimentação do projeto pode-se usar um transformador ou uma fonte chaveada, dentre estas será escolhida a segunda opção. A fonte chaveada foi escolhida devido o seu baixo volume, menor peso e melhor eficiência na transferência de potência em relação a um transformador linear convencional. A grande desvantagem deste tipo de fonte é a

complexidade do projeto da mesma e também o cuidado com os possíveis distúrbios eletromagnéticos, aspectos estes que serão levados em consideração na construção da estrutura e no layout do circuito.

### 1.4.3 Subárea: Processamento de Sinais

A classificação desta subárea foi definida a partir da necessidade de tratar os dados analógicos do mundo real dentro do campo digital para processamento destes no microcontrolador escolhido e de gerar um sinal de resposta aos dados analógicos. De acordo com a Figura abaixo podemos visualizar no corpo do projeto, os blocos destacados em vermelho, as partes responsáveis pela subárea processamento de sinais. Portanto há a divisão dessa subárea em duas principais funções.

A primeira função consiste em realizar o processo de conversão das entradas analógicas dos blocos 1 e 2 da Fig.(5), em valores digitais a serem lidos pelo microcontrolador ESP32 onde é configurado o controlador PID. As entradas analógicas a serem convertidas no bloco 1 e 2 respectivamente são, as três constantes de controle que serão valores gerados a partir de um potenciômetro e um valor de entrada referente ao andar desejado para o controlador.

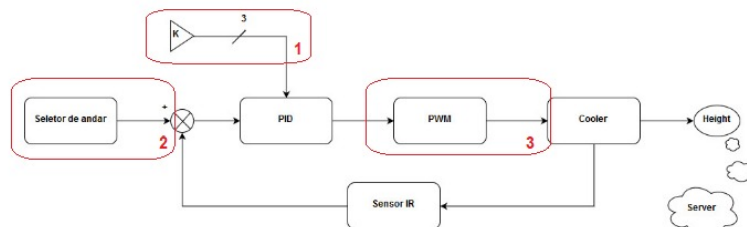


Figura 5 – Diagrama de blocos do projeto, com atuação de Processamento de Sinais.

A segunda função se refere ao bloco 3, que é definido pela implementação de um gerador de sinal PWM a ser enviado para o *cooler* que fará a elevação do peso, a partir da resposta do controlador PID. A partir dessas funções, os perfis dos membros da subárea foi traçado de modo que o grupo apresente conhecimento sólido nas áreas de sinais analógicos, sinais discretos, conversões A/D, sistemas microprocessados e circuitos osciladores; a formação do grupo é bem sucedida nesse aspecto

#### 1.4.3.1 Dispositivo para PWM

PWM é a abreviação de Pulse Width Modulation ou Modulação de Largura de Pulso e refere-se ao conceito de pulsar rapidamente um sinal digital em um condutor. Além de várias outras aplicações, esta técnica de modulação pode ser utilizada para simular



uma tensão estática variável e é comumente aplicada no controle de motores elétricos, aquecedores, LEDs ou luzes em diferentes intensidades ou frequências.

Esse dispositivo trabalha de forma similar a um interruptor que liga uma fonte a uma carga. Quando o interruptor está aberto não há corrente na carga e a potência aplicada é nula. No instante em que o interruptor é fechado, a carga recebe a tensão total da fonte e a potência aplicada é máxima. O interruptor fechado pode definir uma largura de pulso pelo tempo em que fica nesse estado, e um intervalo entre pulsos pelo tempo em que ele fica aberto. Os dois tempos juntos definem o período, e consequentemente, uma frequência de controle.

A relação entre o tempo em que temos o pulso e a duração de um ciclo completo de operação do interruptor nos define ainda o ciclo ativo, conforme a Figura 6.

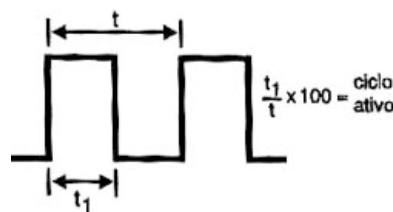


Figura 6 – Exemplo PWM

No presente projeto, o PWM será implementado em um microcontrolador que fará o controle do motor DC que levantará o elevador por impulsão eólica. O que definirá o ciclo ativo e as frequências de controle será o controlador PID que estará implementado no microcontrolador, de forma que o intuito é controlar a potência do motor.

A função do PWM dentro do sistema de controle é ser o atuador da planta controlada pelo PID. O algoritmo foi implementado no microcontrolador ESP32, onde sua entrada é obtida de forma interna e digital.

#### 1.4.4 Subárea: Estrutura

A subárea Estrutura foi criada com o intuito de assumir a responsabilidade de confeccionar a estrutura física em que o projeto irá ser montado. Para concebê-la, o processo de criação foi dividido em quatro etapas, sendo estas, coleta de especificações, modelagem 3D, escolha de materiais e confecção.

Durante a primeira etapa, receberemos as necessidades e especificações dos componentes eletrônicos usados em outras subáreas para adaptar na estrutura. Seguindo para a segunda etapa, na qual a estrutura será desenvolvida no programa *Catia V5*.

Já na terceira etapa serão selecionados os materiais para formação de uma estrutura rígida e resistente, tendo em vista que esta irá suportar os componentes eletrônicos do

sistema de controle, além de também servir para isolar a parte do tubo de vento, que irá regular a altura do objeto flutuante, com o ambiente externo a fim de evitar interferências no sistema.

Por último, os materiais devem ser dimensionados e agrupados seguindo o projeto desenvolvido no software 3D para então iniciar a produção da estrutura e entregar o produto final.

#### 1.4.5 Subárea: Sensoriamento

Para o controle do protótipo proposto, se faz necessário a utilização de sensores para a aquisição de dados, como a altura. Sendo assim, é necessário uma pesquisa de mercado dos diversos tipos de sensores que atendam os requisitos do escopo e que também tenham o melhor custo benefício associado para que assim possa ser feita a escolha do sensor.

Podemos pontuar algumas atividades da área de sensoriamento:

- Levantar sensores com as especificações necessárias e seus respectivos custos;
- Proporcionar ao controlador o feedback, ou seja, a realimentação dos dados medidos através do sensor. Estes têm a funcionalidade de proporcionar ao sistema de controle a capacidade de se adaptar à nova medida recebida.
- Fazer os devidos testes para o sensor escolhido em um ambiente semelhante ao do protótipo final, visando validar e calibrar as medições.
- Projetar filtros e algoritmos para tratar o sinal dos sensores, visando suprimir o ruído contido nas medições.

#### 1.4.6 Subárea: Servidor WEB

Do que se trata? Se trata de um servidor que irá receber dados da ESP e gerar informações úteis aos usuários a partir desses dados. A comunicação entre o microcontrolador e o servidor se dá por meio do envio de eventos, alarmes, comandos e respostas, que reúnem todas as informações e as exibe ao usuário. Serão gerados gráficos e relatórios que irão descrever o comportamento do sistema em tempo real. Esses dados poderão ser acessados a partir de computadores, celulares e afins.

Qual o objetivo dentro do sistema de controle? Essa sub área é referente a criação do Servidor WEB usando HTML, TCP/IP e Javascript no ESP32, NodeMcu, para plotagem de gráficos referentes variações impostas às variáveis de controle que influenciam o sensor de distância. Nesse servidor web, os gráficos serão fornecidas pelo Mcu através da conexão da internet e serão exibidos através de uma interface gráfica.

Quais tecnologias serão necessárias para o desenvolvimento?

- HTML: Será utilizada pois se trata de uma linguagem de marcação de texto designada para desenvolver e definir o layout de um website.
- Transmission Control Protocol/Internet Protocol(TCP/IP): Trata-se de um conjunto de protocolos de comunicação entre computadores. Esse serviço será utilizado, pois, ele pode ser visto como um conjunto de camadas, onde cada camada é responsável por um grupo de tarefas, trazendo assim, um conjunto de serviços bem definidos.
- Java Script: O Java script será utilizado para, juntamente com o HTML, definir e realizar a plotagem dos gráficos. Esses gráficos serão feitos a partir das bibliotecas que o JS oferece.
- ArduinoIDE (C++): Será utilizado para fazer a conexão entre os dados recebidos do sensor e a página WEB, onde serão mostrados os gráficos resultantes.
- AJAX(Asynchronous JavaScript And XML): É uma tecnologia muito utilizada atualmente e que está em bastante evidência porque ela torna seus aplicativos muito mais dinâmicos e com maiores capacidades de respostas.(MEDEIROS, 2018)

Será utilizado para realizar requisição de dados obtidos pelas entradas do sistema(distância do sensor, variáveis de controle e sinal de referência) em tempo real garantindo a consistência dos dados. A Fig. 7 mostra o funcionamento das requisições utilizando AJAX.

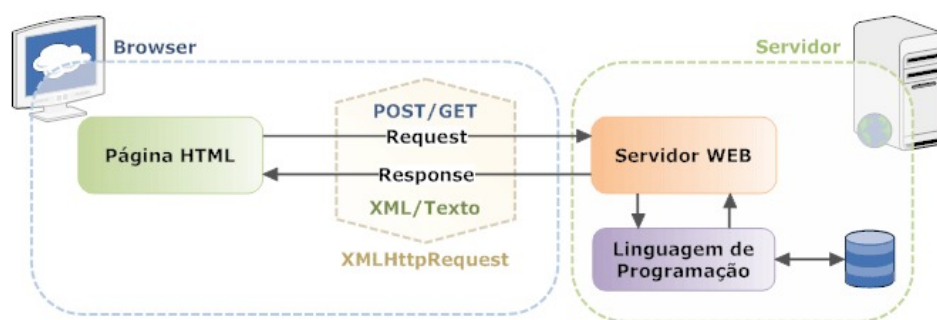


Figura 7 – Funcionamento das Requisições.(DOHMS, 2018)



## 2 Desenvolvimento

### 2.1 Metodologia

Dado a grande quantidade de pessoas envolvidas neste projeto surge a necessidade da adoção de algum método organizacional, caso contrário diversos problemas podem começar a surgir devido essa falta de comunicação e desorganização dos processos.

Tentando buscar a melhor maneira possível concluir o projeto, com o menor uso dos recursos e entregando a melhor qualidade, irar se fazer o uso de duas ferramentas: a Estrutura Analítica de Projetos (EAP)(Apendice [A](#)).

A EAP possui diversas características que facilitarão o acompanhamento do projeto, na qual podemos citar:

- Uma decomposição hierárquica orientada à entregas.
- Subdivisão do trabalho do projeto em partes menores e mais facilmente gerenciáveis.
- Auxílio às partes interessadas na visualização das entregas.

A junção de tais qualidades fez com que um grande valor fosse agregado ao nosso trabalho, devido a tais fatores e juntamente com os possíveis problemas que podem ser evitados, a escolha na adoção de uma EAP foi tomada.

Como se trata de um projeto que visa a criação de um produto, deve-se sempre ter em vista o meio em que tal objeto será inserido e o impacto causado pelo o mesmo. Dado tal fato, o *Business Model Canvas* deve ser acrescentado a EAP para que o grupo não perca a visão do impacto que será causado pelo projeto.

Com a junção dessas duas ferramentas o processo de visualização do caminho do projeto é esclarecido cumprindo assim o objetivo da escolha de uma metodologia.

#### 2.1.1 Equipes e Partes Interessadas

##### 2.1.1.1 Equipe

A equipe é composta por alunos da Turma D, Grupo A, o papel de Gerente foi designado ao membro João Paulo Sanches e a sub-gerência, papel inserido como forma de não haver sobrecarga do gerente, para Felipe Alcântara.

### 2.1.1.2 Usuários

Alunos de sistemas de controle da Universidade de Brasília.

### 2.1.1.3 Clientes

Universidades que possuem laboratórios com foco nas matérias de Controle, tanto digital quanto analógico, vendedores de bancadas didáticas e alunos que fazem a disciplinas focadas em Controle.

## 2.1.2 Materiais, equipamentos e aplicações

### 2.1.2.1 Estrutura

Para a escolha do material da estrutura foi ponderado custo e qualidade do produto e diante das possibilidades de compensado, MDP, MDF foi escolhido o material MDF (Medium Density Fiberboard) por ser um material uniforme, plano e denso. Caracterizando-se ambos por possuir boa estabilidade e grande capacidade de absorção de tinta.

Foi adquirido um motor de corrente contínua com capacidade para executar o trabalho requerido, acoplando uma hélice a qual preenche uma área de formato circular possibilitando a utilização de outros tipos de seção. A partir disso a restrição da estrutura fica em função do raio da hélice.

Para demonstração do fenômeno de estudo é necessário que seja visível a plataforma dentro do elevador, para isso serão feitas fendas sobre o mesmo de modo que facilite a observação da altura da plataforma.

Atendendo a esse requisito, diversos materiais foram cogitados, entre eles os que mais se destacaram foram o vidro, o acrílico e o acetato. Devido a maleabilidade e baixo custo, o acetato foi escolhido dentre os outros já que a primeira opção foi descartada por conta da fragilidade, e o segundo por conta do elevado preço.

Para a estrutura da plataforma flutuante é necessário usar um material rígido, que não se deforme com a força do vento, e leve, logo optou-se por usar EPS (Poliestireno Expandido) ou EPP (Polipropileno expandido) pois ambos são leves e possuem fácil manuseabilidade, sendo que, o EPS é mais leve e o EPP possui maior resistência.

Foi feito o seguinte modelo representativo no software *Catia V5*, na Figura 8.

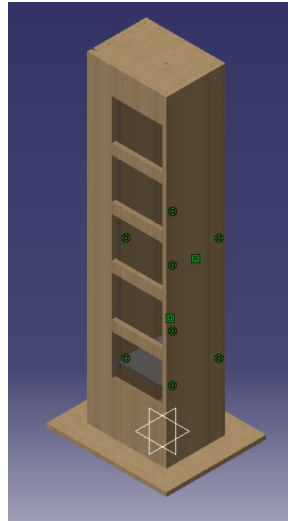


Figura 8 – Modelo Virtual da Estrutura.

### 2.1.2.2 Sensor

Um aspecto crucial em nosso projeto é a escolha do sensor, pois é através dele que toda a geração dos dados é feita. Então fatores como taxa de atualização e alcance do sensor ditarão o nível de qualidade do produto como um todo.

Atualmente no mercado, existe uma grande diversidade de sensores de distância no qual podemos separar em três tipos, em relação de como é feita a medição: os que utilizam ultrassom ou infravermelho (IR) e os que realizam a medição por laser. No nosso caso utilizaremos o último mostrado na Figura (9), pois, sensores ultrassônicos podem sofrer interferência pelas correntes de ar geradas pelo *cooler* o que acabaria com a veracidade dos dados em nossa aplicação.

Tipo do sensor	Modelo do sensor	Preço	Range de operação	Tipo de saída	Precisão	Taxa de atualização
IR	GP2Y0A21Y K0F	R\$ 42,00	10cm - 80cm	Analógica	--	26Hz
LASER	GY-530 VL53L0X	R\$ 41,50	0cm - 200cm	Digital	5 cm	até 400kHz
LASER	VL53L0x Adafruit	R\$ 69,00	30 mm _ 1 m	Digital	30mm	até 400kHz

Figura 9 – Tabela de Preço de Sensores de Distância

Feita uma pesquisa abrangendo o máximo de sensores possíveis chegou-se a esses modelos mostrados na Figura 9. O modelo que utiliza IR foi rejeitado devido a sua taxa de atualização e o GY-530 devido ao seu range de operação, então o sensor escolhido para projeto foi o VL53L0x Adafruit por melhor cumprir os requisitos exigidos do sensor.





### 2.1.3 Sub-sistemas e Algoritmos

#### 2.1.3.1 Circuito de Alimentação

A fonte escolhida foi uma de computador e por ela possuir a seguinte característica: uma saída de 12V e um suporte para uma corrente de 18A. Essa característica é importante devido o consumo do motor que, quando forçado, necessita de uma corrente de cerca de 5 a 7A.

Ainda há a necessidade de alimentar o microcontrolador (ESP32), que é a parte central do circuito de controle do projeto. Este, por sua vez, deve ser alimentado por uma tensão nominal de 5V e necessita tipicamente de 80mA, não será necessário reguladores de tensão já que a fonte já possui uma saída 5V.

Devido à definição do motor, uma melhor especificação do consumo de energia foi alcançado, assim o método de acionamento do motor pelo PWM foi feito através de um transistor de potência. A saída do microcontrolador foi conectada no *Gate* do transistor, o motor entre o *Drain* e nossa alimentação e o *Source* conectado ao terra. Com essa configuração, dado que a saída da ESP32 possui um nível lógico de 3.3V, se faz necessário o uso de mais um circuito de chaveamento pois essa tensão não superava a tensão de *threshold* do MOSFET.

O transistor escolhido foi o IRF540N dado que ele suporta correntes de até 33A e o circuito de elevação de tensão da saída da ESP32, foi feito com um opto-acoplador (4N25), assim elevando a tensão de 3.3V para o valor de 12V no *Gate* do transistor. O resultado de simulação dessa montagem pode ser visto na Figura 11.

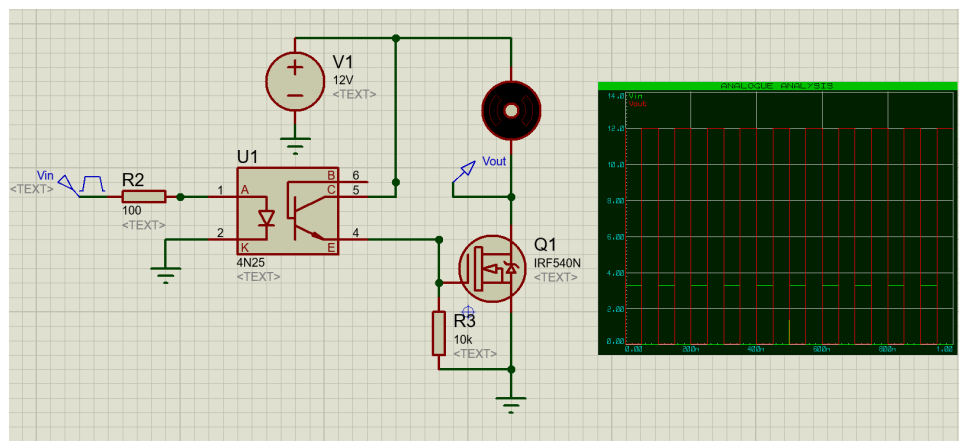


Figura 11 – Circuito de potência para o controle do motor

#### 2.1.3.2 Aquisição de Parâmetros de Entrada

De acordo com os requisitos do projeto, são necessários dois tipos de entrada diferente, seletor de andar e seletor de constantes de controle. Para a seleção de andar

foram escolhidos botões, para manter-se uma igualdade com o painel de seleção de um elevador real.

Já para a seleção das constantes de controle inicialmente foi escolhido potenciômetros comuns, porém estes são muito ruidosos e instáveis, tendo em vista que esta seleção é o requisito principal do projeto, buscou-se uma alternativa que torna-se a seleção mais constante e estável possível, assim sendo decidido o uso de *encoders* rotativos.

O *encoder* rotativo é um tipo de sensor de posição, que determina a posição angular de um eixo de rotação e envia um sinal elétrico, analógico ou digital, de acordo com o movimento rotacional.(ALMEIDA, 2018) Por ser um sinal digital, não é necessário a conversão analógica para digital que é necessária para a utilização do potenciômetro e pelo motivo do *encoder* enviar um sinal só ao ocorrer movimento rotacional perceptível ao sensor, diminuíse os ruídos.

#### 2.1.3.2.1 Implementação

Inicialmente escreveu-se os códigos separados e implementou-os na placa *Arduino*, estes estando funcionando de forma correta sem apresentar inconsistência foram entregues ao grupo de servidor web que juntaram ao código final na Esp32.

Em termos de implementação as constantes de controle foram implementadas sendo somadas por potências de 10, com opções de:  $10^0$ ,  $10^1$ ,  $10^2$  e  $10^3$ , escolhidas utilizando o botão embutido no *encoder*, facilitando assim que estas sejam definidas de forma mais rápida.

A implementação dos botões foi simples, pois ao serem pressionados uma variável deve ser setada e só desligar ao se estabilizar.

#### 2.1.3.3 Servidor e Página WEB

Foi definida a conexão entre o servidor WEB e a ESP32, o *Front-end* da aplicação com HTML, JS, AJAX e CSS. Restando, apenas, a comunicação entre o servidor e o sensor de distância.

Os dados obtidos pelo sensor serão armazenados em um arquivo csv no sistema de arquivos da ESP e a partir de requisições utilizando ajax, os dados serão plotados em um gráfico.

#### 2.1.3.4 Modelagem Matemática

Foi analisado duas possibilidades de extração da planta do sistema em questão, a primeira é encontrar equações diferenciais que relacionam a entrada e saída do sistema por meio de equações físicas teóricas, a segunda é a partir do sistema físico pronto, fazer a

análise empírica da resposta do sistema quando submetida a uma entrada função degrau unitário.

Após diversas pesquisas e tentativas, concluiu-se que a modelagem do sistema a partir de equações matemáticas é de alta complexidade, pois é necessário realizar o equacionamento para cada corpo envolvido e as forças que interagem entre si, no caso, modelagens separadas para plataforma, hélice do motor e PWM do motor, resultando na necessidade do cascadeamento das funções de transferência de cada modelagem, para então obter a planta do sistema. Considerando tal complexidade, o método de modelagem escolhido foi o de testes empíricos dado a estrutura do sistema desenvolvida.

## 2.1.4 Análise de Custos

### 2.1.4.1 Custo de aquisição

Os custos de aquisição previstos no dado momento do projeto, estão dispostos na Tab. (1), podendo estes ser alterado no decorrer da produção.

Equipamento/Serviço	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Fonte Chaveada de 12V18A	1	R\$78,00	R\$78,00
ESP32	1	R\$15,64	R\$15,64
Micro Motor DC 12V 18200RPM	1	R\$20,90	R\$20,90
Placa de EPS (isopor)	1	R\$0,0009/cm <sup>3</sup>	R\$0,34
Chapa de MDF cru	3x(100cmx15cm)	R\$0,005/cm <sup>2</sup>	R\$22,50
Folha de Acetato transparente	2	R\$11,25	R\$22,50
VL53L0x Adafruit	2	R\$69,00	R\$138,00
Botão	5	R\$2,00	R\$10,00
Módulo <i>Encoder</i> Rotacional	3	R\$8,60	R\$25,80
Protoboard	2	R\$14,74	R\$29,48
Hélice	1	R\$7,49	R\$7,49
Componentes e Conectores	1	R\$25,00	R\$25,00
Cortes de madeira	1	R\$20,00	R\$20,00

Tabela 1 – Tabela de custos de aquisição

O Custo Total foi estimado pela Eq.(2.1). Sendo computado no Valor Total os custos de aquisição até o momento.

$$CustoTotal = R\$393,15 \quad (2.1)$$

## 2.2 Requisitos

### 2.2.1 Requisitos Funcionais

RF01 Possibilitar o aluno realizar alterações nas variáveis de controle com portadas no sistema.

RF02 Dispositivos para alternância entre os andares.

RF03 Gerar gráficos em tempo real a partir dos dados obtidos pelos sensores.

RF04 Gerar um relatório com origem, destino e o tempo levado para estabilizar o objeto de acordo com as entradas.

RF05 O sistema deve responder de acordo com a entrada das variáveis de controle, bem como com andar desejado a cada requisição (de troca de andar) efetuada.

### 2.2.2 Requisitos Não-Funcionais

RNF01 Uso de Design responsivo nas interfaces gráficas (Usabilidade).

RNF02 Dados devem estar bem representados nas interfaces.

RNF03 Fácil visualização das variáveis de entrada.

## 2.3 Análise de Riscos

Os riscos referentes ao projeto estão especificados na Tab.(2).

## 2.4 Cronograma e marcos

O objetivo da organização do cronograma é condicionar que todos os subsistemas estejam prontos no ponto de controle 2. O ponto de controle 3 será utilizado para integração dos subsistemas. Foi utilizado o site Team Gantt, para confecção, utilizando o modelo Gantt.

Riscos	Impactos
Não conseguir modelar matematicamente a estrutura:	Atraso na implementação do PID; Falta do modelo matemático para cálculo das constantes.
Queima do Sensor:	Impossibilidade de testes; Impossibilita funcionamento do PID; Não entrega do Projeto.
Descaso dos integrantes do projeto:	Atraso no andamento do projeto; Sobrecarga dos membros ativos.
Subdimensionamento do Componentes do Projeto:	Gastos desnecessários; Atraso no andamento do projeto.
Falta de Ferramentas para confecção da estrutura:	Furos realizados com diâmetros errados; Erro no nivelamento da estrutura; Incapacidade da realização do que foi idealizado.
Membros não capacitados:	Estrangulamento do Fluxo de Projeto; Erros na confecção dos projetos; Repetição de trabalhos mal realizados.

Tabela 2 – Tabela de Riscos



## 3 Resultados

### 3.1 Sensoriamento

Para verificar o funcionamento do sensor de distância foram feitos testes em um protótipo da estrutura, utilizando uma plataforma branca foram medidas varias distâncias de interesse, essas distancia identificam a altura dos andares do sistema. A Figura 12 mostra graficamente o erro da medida real e a obtida no sensor.

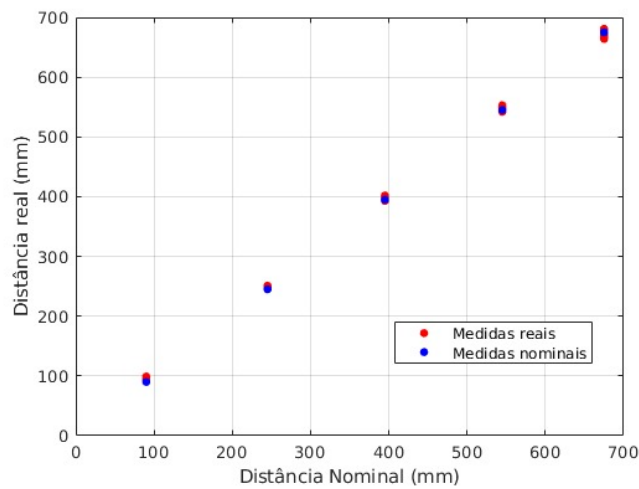


Figura 12 – Erro de precisão do sensor.

Foi ajustado o sensor para atualizar em uma frequência de 1kHz e também foi aplicado o filtro digital, Média Móvel Exponencial (ou Exponential Moving Average, ou EMA), para reduzir o ruído em altas frequências. Dessa forma empiricamente foi determinado um valor para o grau de diminuição de ponderação( $\alpha$ , Equação 3.1) igual a 0.8, onde este resultado nos trouxe uma estabilização na medidas obtidas pelo sensor e não comprometeu a frequência de amostragem.

$$S_n = \alpha \cdot y_n + (1 - \alpha) * S_{n-1} \quad (3.1)$$

Observe que se  $\alpha$  tende a 1 , na Equação 3.1, a EMA tende à medida atual do sensor, ou seja, as variações bruscas são pouco atenuadas. Em contrapartida, se  $\alpha$  se aproxima de 0, a EMA dá menos peso para a medida atual e enfatiza o efeito cumulativo dos dados antigos, cuja ponderação dos dados mais antigos diminui exponencialmente, atenuando assim o ruído presente no sinal.(SHOME et al., 2012) Porém, quanto maior a

atenuação do ruído, mais atraso é inserido à EMA, sendo necessário um ajuste empírico para cada sistema.

Os dados medidos pelo sensor de distância são enviados para a ESP32, que por sua vez, envia-os para um servidor. Esses dados após serem requisitados pelo cliente do servidor são exibidos em um gráfico junto aos parâmetros de desempenho.

## 3.2 Servidor e página Web

Com o final do projeto, o servidor Web fornece para os estudantes da disciplina de sistemas de controle parâmetros de desempenho do controlador PID, através de gráficos e tabelas. Com esses dados é possível ainda gerar um PDF para estudos posteriores, como mostrado na Figura 13.

Para ter acesso a página Web, é preciso conexão a internet ou de um computador ou celular em um *Browser* através do endereço de IP fornecido pela ESP32.

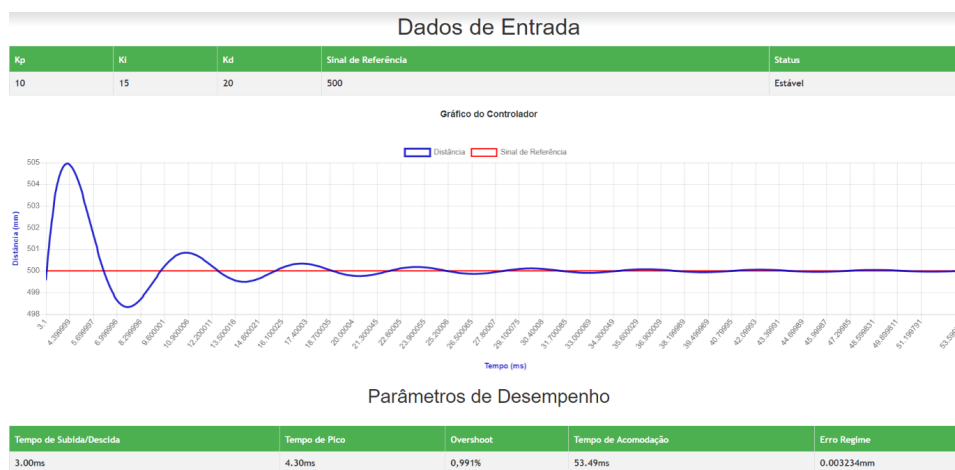


Figura 13 – PDF gerado pela Página Web.

Para redução de tempo na taxa de carregamento da página, que conta com uma velocidade de transmissão de dados de no máximo 150 mbps, foi utilizado o sistema de arquivos com a memória Flash da ESP32. Com isso foi reduzido a quantidade de dados consumidos das API's de estilização (Bootstrap) e do gráfico (Chart JS), elevando a velocidade de carregamento da página.

## 3.3 Integração do Hardware

A integração do Hardware foi realizada numa *proto board*, seguindo o esquemático da Figura 17.



### 3.3.1 Saída PWM

De acordo com testes realizados na estrutura, obtivemos uma faixa de valores de trabalho para o PWM. Esta faixa está próximo a 50% e 100%, pois para valores de *duty-cycle* abaixo de 50% a plataforma não sobe.

Realizando-se os testes do PWM pode-se notar que a plataforma estava enganchando durante sua subida, sendo necessário realizar mudanças na mesma, secção 3.3.2.

Devido a plataforma ser leve e a potência do motor alta, esta faixa de *duty-cycle* controlada pelo PWM é muito pequena, sendo mantido este modo de trabalho pela falta de tempo para aprimoramento do PWM. A Figura 14 foi retirada enquanto se realizava os testes.



Figura 14 – Realização de teste com o PWM.

### 3.3.2 Estrutura

A dimensão da estrutura foi decidida após ter sido definido qual motor ia ser usado e com qual hélice, de tal modo que o encaixe fique bem justo do motor com a estrutura para obter o máximo de aproveitamento do fluxo de ar gerado. O material foi escolhido a

partir da disponibilidade de compra em lojas locais, e levando em consideração o custo e dificuldade de trabalho de forma que se torne viável.

Na base, por conta da viabilidade, foi feito um furo para o encaixe do motor e outros diversos furos para a entrada de ar. Contudo, o fluxo de ar não se apresentou satisfatório e para solucionar elevou-se a estrutura em 3 centímetros com relação a base, deixando apenas a parte frontal e traseira do elevador aberta para entrada de ar ser proporcional.

Ainda, muitas modificações foram feitas na estrutura por conta dos resultados experimentais, principalmente na entrada de ar para o motor, foi ajustada a estrutura superior do elevador para aumentar a passagem de ar e não atrapalhar a medição do sensor de distância, fazendo uso de uma peça com 18 x 2,5 x 0,8 cm de MDF, com 2 outras menores para melhorar o acoplamento na parte superior.

Na lateral foram utilizadas duas dobradiças para possibilitar a utilização de uma porta de tal modo que a parte de circuitos fique oculta e seja aberta somente quando houver necessidade de manutenção, para fechar foi utilizado um velcro.

Por fim, a plataforma não estava subindo de forma nivelada e constante por conta do atrito, então foram adicionados 4 canudos com guias passando por dentro deles para que desta forma a plataforma não entrasse em contato com as laterais.

Também foram fixados os *encoders* e botões na estrutura e os seus fios conectados por baixo da base, para passagem dos fios foram adicionados 4 pés com 7 centímetros de altura. Na Figura 15 pode-se visualizar a estrutura final.



Figura 15 – Estrutura Finalizada.

### 3.4 Modelagem Matemática

Primeiramente começou-se o trabalho dessa seção tentando caracterizar o sistema de forma geral. Dado varias pesquisas e ajuda de alguns professores, e com base no livro ([GARCIA, 2005](#)) conseguiu-se as seguintes características:

- Estático - as entradas permanecem as mesmas e somente a saída é alterada.
- MISO - Múltiplas entradas e uma saída (*Multiple input, single output*)
- Tempo discreto - Devido o controle ser feito por um microcontrolador
- Invariante no tempo - Os parâmetros do sistema não variam ao longo do tempo
- Amplitude contínua - A magnitude do sinal pode assumir qualquer valor dentro de um intervalo.

A partir dessa etapa tivemos varias ideias para modelar o nosso sistema matematicamente falando, através de equações diferenciais. Passamos diversas semanas pensando nesse processo porem não avançamos muito, percebemos que é um trabalho de grande

complexidade e que não estávamos aptos para chegar em algum resultado nesse período de tempo. Então foi decidido que seria usada a resposta degrau da planta, assim que ela ficasse pronta, para tirar a função de transferência do sistema, e admitiu-se que seria feito uma aproximação do sistema para um sistema de segunda ordem.

Dado a demora da finalização da estrutura e com intuito de não perder tempo, foi-se trabalhando num modelo de referência. Esse modelo tem o intuito de confrontar a veracidade dos dados resultantes, assim validando os resultados. Pegando um sistema de segunda ordem e um controlador PID genéricos foi desenvolvido a transformação do domínio de Laplace para o domínio Z, seguindo como base o capítulo 12 do livro (CHEN, 1995).

Transformação do PID para o domínio Z:

$$G(s) = K_p + K_d \cdot s + \frac{K_i}{s} \quad (3.2)$$

$$G(z) = \frac{\left(K_p + \frac{K_i \cdot T_s}{2} + \frac{K_d}{T_s}\right) + \left(-K_p + \frac{K_i \cdot T_s}{2} - \frac{2K_d}{T_s}\right)z^{-1} + \frac{K_d}{T_s}z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (3.3)$$

Transformação do sistema de segunda ordem para o domínio Z, onde  $K = \frac{2}{T_s}$ :

$$G(s) = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \quad (3.4)$$

$$G(z) = \frac{(b_0 K^2 + b_1 K + b_2) + (-2b_0 K^2 + 2b_2)z^{-1} + (b_0 K^2 - b_1 K + b_2)z^{-2}}{(a_0 K^2 + a_1 K + a_2) + (-2a_0 K^2 + 2a_2)z^{-1} + (a_0 K^2 - a_1 K + a_2)z^{-2}} \quad (3.5)$$

Amostrador de ordem zero, para modelagem de sistemas discretos:

$$G(z) = (1 - z^{-1}) \cdot Z\left\{L^{-1}\left[\frac{G(s)}{s}\right]\right\} \quad (3.6)$$

Multiplicando as equações 3.3 e 3.5 e levando em consideração a amostragem em nosso sistema modelada pela equação 3.6 constrói-se o nosso modelo de referência. Assim é possível variar quaisquer parâmetros, e com auxílio do Matlab, podemos gerar o resultado de qualquer sistema discreto. Então basta fazer diversos testes empíricos com a estrutura para a retirada dos termos do sistema de segunda ordem.

Para a implementação do PID no microcontrolador ainda se faz necessário algumas manipulações para tirar a equação das diferenças da equação 3.3. O resultado dessas manipulações pode ser vistas na equação 3.7.

$$Y[n] = Y[n-1] + \left(K_p + \frac{K_i T_s}{2} + \frac{K_d}{T_s}\right)X[n] + \left(-K_p + \frac{K_i T_s}{2} - \frac{2K_d}{T_s}\right)X[n-1] + \frac{K_d}{T_s}X[n-2] \quad (3.7)$$

A demora da finalização da estrutura e o sensor de distância ter sido queimado, os resultados dos testes do PID não estarão presentes neste documento.



## 4 Conclusão

### 4.1 Considerações Finais

Em projetos os riscos devem ser definidos de forma profunda, buscando realmente ter uma visão global do projeto no momento de definição, assim facilitando a abordagem quando estes acontecerem.

Um risco não estabelecido foi o atraso na finalização da estrutura, esta ponto principal para o encaminhamento de outras áreas, como modelagem matemática, e para realização dos teste dos sistemas.

Dado o momento de entrega do presente documento o projeto ainda estava em fase de finalização. Um dos riscos previstos, na Tabela 2, acabou realmente ocorrendo, o sensor de distância queimou e a entrega de um novo estava datada até o dia 3 de julho de 2019, com isto o projeto acabou sofrendo um atraso na fase de integração/finalização.

Contudo foi realizado os testes do PWM, botões de seleção de andar, Servidor Web, seleção de constantes de controle e estrutura finalizada. Bastando realizar o teste do PID, este já sendo parte final do projeto, porém o ponto chave de entrega.





# Referências

- ALMEIDA, F. *O que é Encoder?* 2018. Acessado em 29 de 05 de 2019. Disponível em: <<https://www.hitecnologia.com.br>>. Citado na página 24.
- CHEN, C.-T. *Analog and Digital Control System Design: Transfer-function, State-space, and Algebraic Methods*. New York, NY, USA: Oxford University Press, Inc., 1995. ISBN 0030940702. Citado na página 34.
- CURVELLO, A. *ESP32 – Um grande aliado para o Maker IoT*. 2018. Acessado em 27 de 04 de 2019. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/esp32-um-grande-aliado-para-o-maker-iot/>>. Citado na página 22.
- DOHMS, R. *AJAX e PHP: Aprendendo a base*. 2018. Acessado em 29 de 05 de 2019. Disponível em: <<http://blog.doh.ms/2008/08/18/ajax-e-php-aprendendo-a-base-1/?lang=pt-br>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 17.
- GARCIA, C. *Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos Vol. 1*. EDUSP, 2005. ISBN 9788531409042. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=PdxwQs6P0nIC>>. Citado na página 33.
- ABENGE. *Controlador PID Analógico: uma abordagem didática em laboratório*, v. 33. Citado na página 10.
- MEDEIROS, H. *Ajax Básico: Introdução*. 2018. Acessado em 29 de 05 de 2019. Disponível em: <<http://www.linhadecodigo.com.br/artigo/3585/ajax-basico-introducao.aspx>>. Citado na página 17.
- NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 7ª. ed. [S.l.]: LTC, 2017. ISBN 978-85-216-3436-2. Citado na página 12.
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5ª. ed. [S.l.]: Pearson, 2011. ISBN 978-85-7605-810-6. Citado na página 9.
- SHOME, S. et al. Performance evaluation of different averaging based filter designs using digital signal processor and its synthesis on fpga. In: *International Journal of signal processing, Image processing and Pattern Recognition*. [S.l.]: Citeseer, 2012. v. 5, n. 3, p. 75–92. Citado na página 29.
- SILVA, A.; CIM, M. *Gestão de projetos: disciplina na modalidade a distância. Florianópolis: SENAI/SC*, 2012. Citado na página 11.



# APÊNDICE A – Estrutura Analítica de Projetos

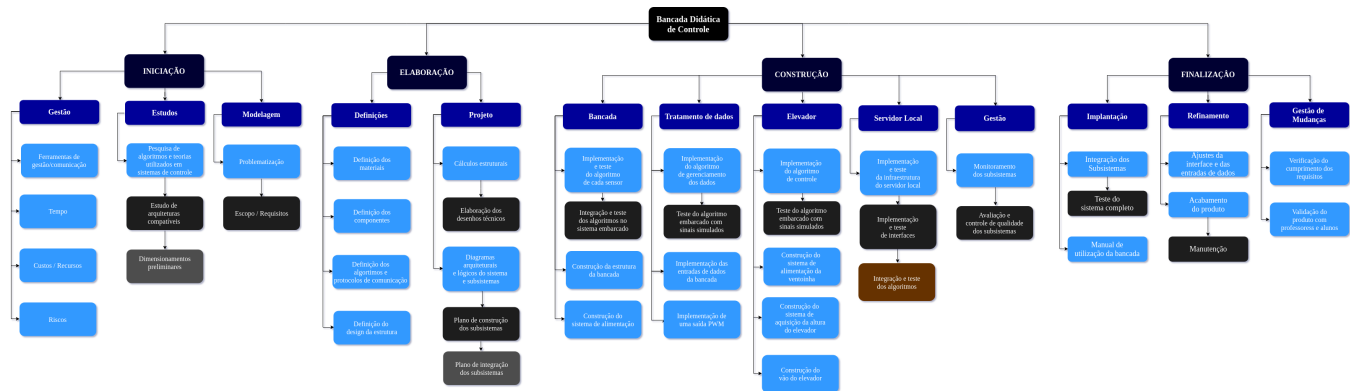


Figura 16 – Estrutura Analítica de Projetos.



# APÊNDICE B – Esquemático Circuitos

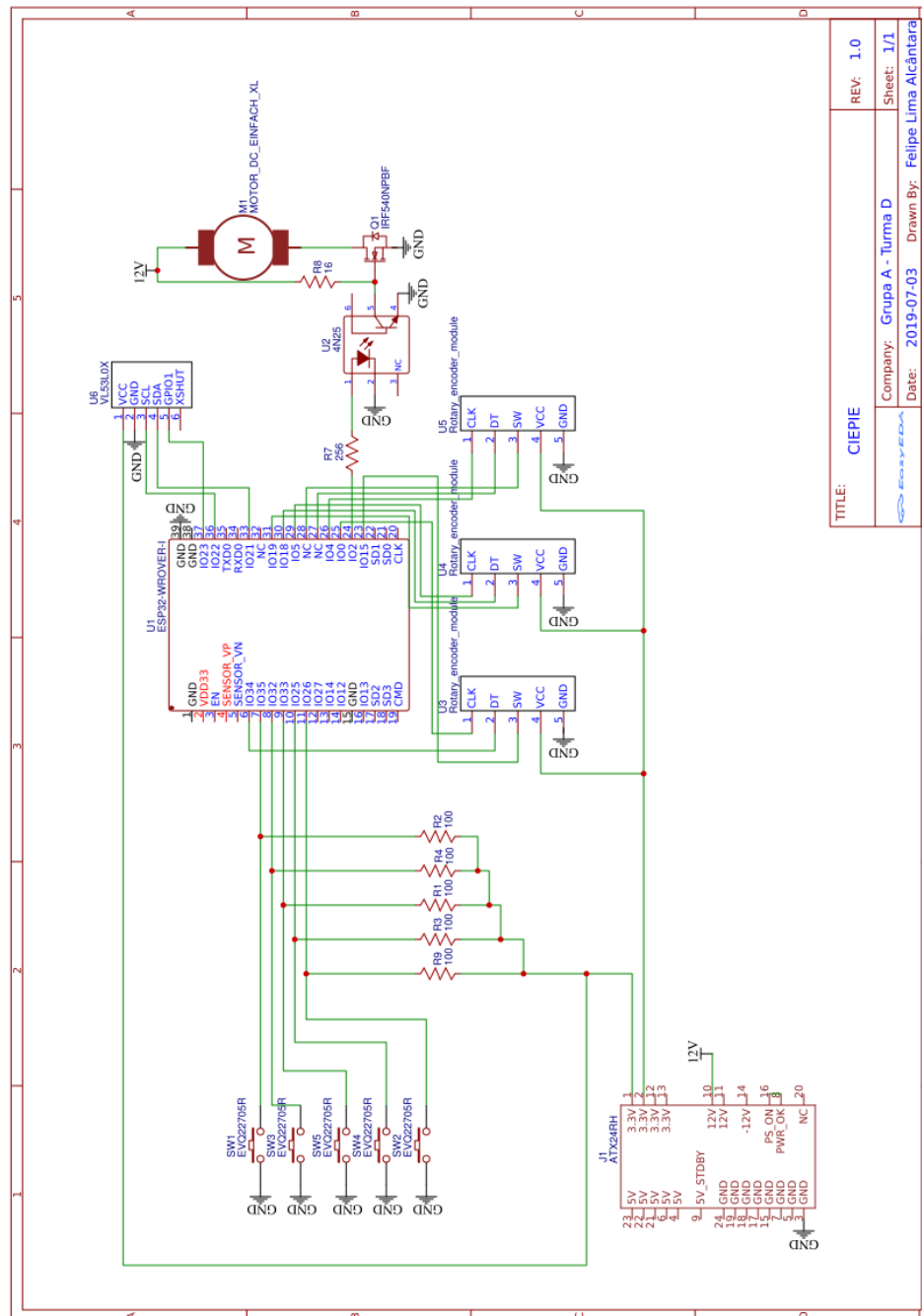


Figura 17 – Esquemático do circuito implementado.