



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

CONTROLE DE ROTAÇÃO DE UMA MINI TURBINA UTILIZANDO SUPERVISÓRIO  
SCADA/MOBILE

**WESNEY TRAJANO BRAZ**

João Pessoa – PB  
2019

**WESNEY TRAJANO BRAZ**

**CONTROLE DE ROTAÇÃO DE UMA MINI TURBINA UTILIZANDO SUPERVISÓRIO  
SCADA/MOBILE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de tecnólogo, do curso superior de tecnologia em automação industrial, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – campus João Pessoa

Orientador: Prof. Dr. Alberdan Santiago de Aquino

João Pessoa – PB  
2019

## **FOLHA/TERMO DE APROVAÇÃO**

**WESNEY TRAJANO BRAZ**

### **CONTROLE DE ROTAÇÃO DE UMA MINI TURBINA UTILIZANDO SUPERVISÓRIO SCADA/MOBILE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovada como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo, do Curso de tecnologia em automação industrial pelo Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Paraíba – Campus João Pessoa, pela seguinte banca examinadora:

---

Prof. Dr. Alberdan Santiago de Aquino, Orientador  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

---

Prof Dr. Marcelo Magalhães Ávila Paz, Membro da banca - Examinadora  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

---

Prof Msc. Robério Paredes Moreira Filho, Membro da banca - Examinadora  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

João Pessoa, aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

Dedico este trabalho de conclusão de curso para minha namorada,  
Eduarda Militão que sempre me apoiou ao longo da jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado e dado força, foco e fé nos momentos mais difíceis da minha vida, sempre iluminando meus passos e me levantando.

Aos meus amigos e colegas dentro do IFPB, que formei ao longo de 8 anos de estudo dentro da instituição, em especial aos companheiros de treinos da equipe de atletismo que sempre estiveram junto nas competições torcendo, dando força, incentivo e apoiando a minha continuidade dos estudos.

Aos meus professores do curso de eletrônica e de automação industrial por sempre estarem dispostos a ajuda e ensinar, mesmo fora da sala de aula, em especial ao meu orientador pelo qual me ajudou em muitos trabalhos e dedicou parte do seu tempo a contribuir com a minha formação profissional, abrindo os horizontes para novos caminhos e uma nova perspectiva de segmento de carreira.

Aos meus pais João Trajano da Silva Junior e Edna Braz Trajano Silva, meu irmão Wesley Trajano Braz, por sempre me ajudarem dando todo o apoio necessário, para ter uma estrutura de concluir os meus estudos e para erguer a cabeça e seguir em frente, mesmo quando estava em dificuldade na caminhada.

A minha querida turma, que perseverou e colaborou com o crescimento um dos outros, sempre rindo nos momentos mais angustiantes do curso.

E finalmente, mas não menos importante a minha amada namorada, Eduarda Militão Silva que me transformou em um filho, irmão, estudante, amigo e atleta melhor, sempre estando ao meu lado, nos dias de lutas e de glórias.

*“O coração do homem planeja os seus caminhos, mas  
Deus determinara os seus passos”  
Provérbios 16-9*

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta um projeto de controle, aplicado a um protótipo de uma mini turbina, este sistema dinâmico foi construído com o foco em simular uma turbina de avião e investigar as perturbações inerentes aos ventos que ocorrem na região frontal da mesma, de forma que possa auxiliar ou dificultar a turbina em manter a sua velocidade rotórica de referência. O sistema possui a placa de prototipagem eletrônica Arduino UNO, onde a mesma atuará como placa de controle, um modulo ponte H L298M como driver de potência, um sensor óptico para obter a velocidade da turbina e um motor CC que servira de dispositivo eletromecânico para movimentar a hélice. Os sistemas de controle são bastante difundidos em diversas áreas da tecnologia, este trabalho irá apresentar uma metodologia de aplicação em motores CC, de forma que não disponha de parâmetros do sistema, realizando o método globalista, denominado de caixa preta. Neste método são ignorados os fenômenos que ocorrem dentro do sistema, utilizando uma entrada do tipo degrau para observar a resposta do sistema e com os parâmetros obtidos da curva de reação é encontrado uma equação que representa o sistema. Para que posteriormente sejam realizados os cálculos necessários para projetar e sintonizar o controlador, finalizando com a implantação no protótipo e comparação dos resultados simulados e reais.

Palavras-chaves: Controle; Turbina; Velocidade.

## **ABSTRAC**

This work presents a control project, applied to a prototype of a mini turbine, this dynamic system was built with the focus on simulating an airplane turbine and investigate the perturbations inherent to the winds that occur in the frontal region of the same, so that it can assist or hinder the turbine in maintaining its reference rotor speed. The system has the Arduino UNO electronic probe board, where it will act as a control board, a H L298M bridge module as a power driver, an optical sensor to obtain the turbine speed and a DC motor that would serve as an electromechanical device to move the propeller. The control systems are very widespread in several areas of technology, this work will present a methodology of application in DC motors, so that it does not have system parameters, realizing the globalist method, called the black box, where the phenomena are ignored which occur within the system, using a step-type input to observe the system response, with the parameters obtained from the reaction curve an equation is found that represents the system so that later the necessary calculations are carried out to design and tune the controller, finalizing with the implementation in the prototype and comparison of the simulated and real results.

**Keywords:** Control; Turbine; Velocity.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arduino UNO .....	15
Figura 2 - Ponte h .....	16
Figura 3 - Sinal PWM.....	17
Figura 4 - Sensor de obstáculo reflexivo .....	17
Figura 5 - Lógica de funcionamento.....	18
Figura 6 - Motor CC com e sem escova .....	19
Figura 7 - Sistema de controle digital.....	20
Figura 8 - Sistema de controle de malha aberta .....	20
Figura 9 - Sistema de controle de malha fechada.....	21
Figura 10 - Gráfico de comparação contínua e discreto .....	22
Figura 11 - Sistema supervisorio .....	23
Figura 12 - Internet of Things.....	24
Figura 13 - Motor a reação .....	25
Figura 14 - Fluxograma da metodologia .....	26
Figura 15 - Peças lixadas .....	27
Figura 16 - Peças pintadas.....	27
Figura 17 - Peça com o motor e sensor .....	28
Figura 18 - Mini turbina montada .....	28
Figura 19 - Base e mini turbina .....	29
Figura 20 - Esquema elétrico do protótipo .....	29
Figura 21 - Tacômetro .....	30
Figura 22 - Supervisorio Elipse SCADA do sistema .....	31
Figura 23 - Supervisorio Elipse Mobile do sistema .....	32
Figura 24 - Caracterização do sistema.....	32
Figura 25 - Equação PWM para RPM.....	33
Figura 26 - Equação RPM para PWM.....	34
Figura 27 - Resposta do sistema a entrada do tipo degrau .....	35
Figura 28 - Método de Smith de 1º ordem .....	36
Figura 29 Método de Sundaresan-Krishnaswamy.....	37
Figura 30 - Método de Broida .....	38
Figura 31 - Modelagem matemática.....	38

Figura 32 - Modelos discretização.....	41
Figura 33 - Gráfico das funções pelo método de Broida.....	44
Figura 34 - Gráfico das funções pelo método de Sundaresan .....	45
Figura 35 - Malha de controle do sistema dinâmico .....	46
Figura 36 - Supervisório SCADA com o controlador PI .....	48
Figura 37 - Supervisório Mobile com o controlador PI.....	48
Figura 38 - Resposta do controlador PI para a modelagem de Broida.....	49
Figura 39 - Resposta do controlador PI para a modelagem por Sundaresan-Krishnaswamy...	49
Figura 40 - Aplicação de uma perturbação ao sistema.....	50

## **LISTA DE TABELA**

Tabela 1 - Comparação dos sensores.....	30
Tabela 2 - Validação dos modelos matemáticos .....	39
Tabela 3 - Efeitos dos termos do controlador PID .....	42
Tabela 4 - Sintonia por Skogestad.....	42

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO .....	13
1.1 - OBJETIVOS.....	14
1.1.1 - Objetivo geral.....	14
1.1.2 - Objetivos específicos .....	14
2 - REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
2.1 – ARDUINO UNO.....	15
2.2 – PONTE H E PWM .....	16
2.3 – SENSOR DE OBSTÁCULO REFLEXIVO INFRAVERMELHO IR .....	17
2.4 – MOTOR CC .....	18
2.5 – SISTEMAS DE CONTROLE .....	19
2.5.1 – Sistemas de controle de malha aberta e fechada.....	20
2.5.2 – Modelagem matemática.....	21
2.5.3 – Tempo de amostragem.....	22
2.5.4 – Discretização .....	22
2.6 – SISTEMAS SUPERVISÓRIOS .....	23
2.7 – MOTOR A REAÇÃO .....	24
3 - METODOLOGIA .....	26
4 – RESULTADOS .....	48
5 – CONCLUSÃO.....	51
6 - REFERÊNCIAS .....	52
7 - APÊNDICE .....	55
8 - ANEXO.....	56

## 1 - INTRODUÇÃO

O controle das variáveis de um sistema, criado pelo homem, vem sendo desenvolvido e aplicado de inúmeras maneiras possíveis. Com a invenção do regulador de velocidade por James Watt no século XVIII para uma máquina a vapor, foi possível dar um impulso necessário para revolução industrial, que teve uma imensa contribuição no setor econômico e social.

Nos tempos modernos esse tipo de controle mecânico foi sendo superado pelo controle por dispositivos eletrônicos, onde a realimentação é fundamental para a implementação do controle, sendo necessário um modelo matemático para identificar alguns parâmetros do sistema e assim pode representa-lo de forma mais fidedigna possível.

Este projeto apresenta a construção e implementação de um controlador digital para um protótipo de uma mini turbina, onde a variável a ser controlada é a velocidade, a qual é medida por meio de um sensor óptico. O monitoramento dessa variável é imprescindível e devido a isso, foi aplicado um sistema supervisório SCADA/Mobile onde é possível definir a referência e observar em tempo real as alterações no sistema, sendo no computador que esteja o supervisório ou em outro dispositivo, mas que tenha acesso a rede de internet, tendo em vista o grande crescimento da utilização da internet para armazenamento de dados na nuvem, essa é apenas uma das aplicações possíveis para as indústrias e como a revolução 4.0 pode impacta positivamente o desenvolvimento tecnológico nas empresas.

Tendo em vista que o projeto dispõe de um protótipo de uma turbina de avião, onde o veículo em escala real percorre em altas velocidades e altitudes, portanto a perturbação será o vento colidindo com a região frontal da mesma, onde pode ocasionar uma alteração indesejada da velocidade do motor, tornando assim uma pesquisa relevante para aferir se os ventos aumentam ou diminuem a rotação da turbina e se o sistema de controle pode atenuar ou eliminar esse erro de forma eficiente e eficaz.

O projeto contempla uma vasta área de conhecimentos, sendo estes eletrônica básica, linguagem de programação, microcontroladores, instrumentação, automação de processos industriais, sistemas de controle e controle digital, integrando de forma pratica os conhecimentos teóricos de cada área.

## 1.1 - OBJETIVOS

### 1.1.1 - Objetivo geral

Desenvolver um controlador que possa manter a velocidade de um motor CC em um protótipo de uma mini turbina na referência desejada pelo usuário, com a presença ou não de perturbações, aplicando um sistema de supervisão e controle dos principais parâmetros do sistema dinâmico.

### 1.1.2 - Objetivos específicos

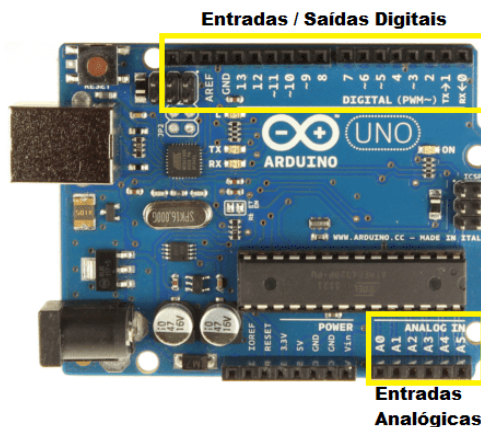
- Construir a plataforma do projeto;
- Obter dados dos parâmetros do sistema;
- Calcular as funções que melhor representam o sistema dinâmico tanto no domínio de Laplace quanto no domínio discreto;
- Realizar a sintonia do controlador;
- Simular resultados obtidos;
- Elaborar um algoritmo em linguagem de programação C/C++ que possa realizar o controle do motor CC;
- Implementar o algoritmo no Arduino para efetuar os ensaios;
- Analisar o protótipo comparando os ensaios a simulação;
- Construir um supervisor local e remoto.

## 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 – ARDUINO UNO

Neste capítulo serão apresentadas as fundamentações teóricas para o entendimento dos assuntos e conteúdos abordados de forma que fique clara o entendimento dos temas relacionados o projeto. No projeto será utilizado a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino UNO, a qual é baseada no processador ATmega328, que possui 20 pinos de I/O, dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM (3,5,6,9,10 e 11), este sinal de saída possui uma resolução de 8 bits, ou seja, o valor será convertido entre 0 a 255, além dos pinos digitais possui também 6 pinos de entradas analógicas (pinos A0 a A5), onde pode ser feita a conversão com uma resolução de 10 bits, semelhante ao mesmo método anterior o valor será convertido entre 0 e 1023, contém pinos exclusivos para uma comunicação serial( RX pinos 0 – TX pinos 1), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP, e um botão de reset.

**Figura 1 - Arduino UNO**



Fonte: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-uno/>>.

Acessado em: 20 mar 2019.

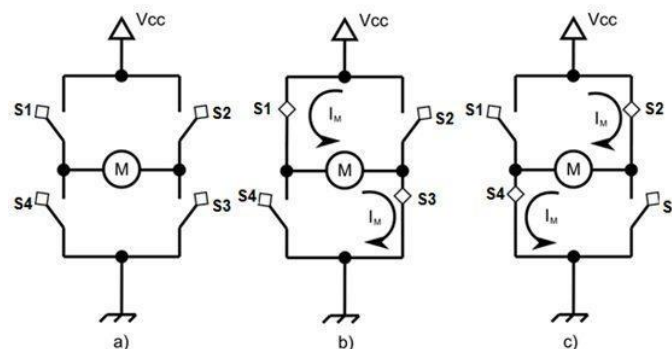
O Arduino UNO, possui dimensões de 68,58mm x 53,34mm e pode ser alimentado via conexão USB ou com uma fonte de alimentação externa de maneira a poder operar com uma fonte externa de 6 a 20 volts. Entretanto é recomendado trabalhar na faixa de 7 a 12 volts. Esta plataforma pode ser programada com o software Arduino (IDE), sendo este open-source e disponibilizado pelo fabricante gratuitamente.

## 2.2 – PONTE H E PWM

O circuito ponte H é denominado assim devido ao seu formato, onde a conexão entre os 4 transistores e a carga formam uma estrutura semelhante a letra H, este circuito pode controlar o sentido de giro de um motor CC, como pode ser visto na figura 2, também é possível realizar o controle da velocidade em conjunto com a utilização de uma entrada PWM ( Pulse Width Modulation ) no circuito, devido a isto é regulado o nível de tensão da saída da ponte h. Além de ser utilizada para controlar a direção e velocidade de rotação de motores CC, as pontes H também podem ser aplicada em outros circuitos com objetivos distintos tais como:

- Inversores de potência (conversor DC-AC)
- Conversores AC/AC
- Conversores DC-DC push/pull

**Figura 2 - Ponte h**

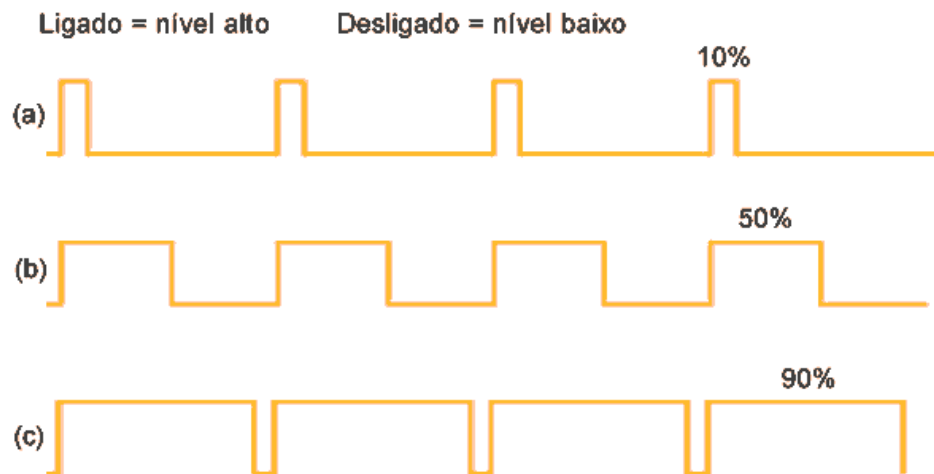


Fonte: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/driver-motor-com-ponte-h-l298n/>>.

Acessado em: 20 mar 2019.

O sinal PWM é bastante difundido onde é necessário utilizar uma técnica de controle para níveis de tensão, o duty cycle é responsável por realizar essa operação, onde de acordo com a frequência de chaveamento dos transistores é possível adquirir uma forma de onda quadrada de alta frequência que pode variar os níveis de estado alto e estado baixo, variando de 0 a 100% do valor de entrada, a figura 3 ilustra de forma mais didática essa técnica. A modulação de largura de pulso fornece um método para diminuir o fator DHT (Distorção Harmônica Transiente) da corrente de carga, além disso, a amplitude da tensão de saída pode ser controlada por meio de formas de onda moduladoras. Das vantagens da modulação por PWM são as reduções de usos de filtros para reduzir os harmônicos e controle de amplitude de saída (HART, 2001)



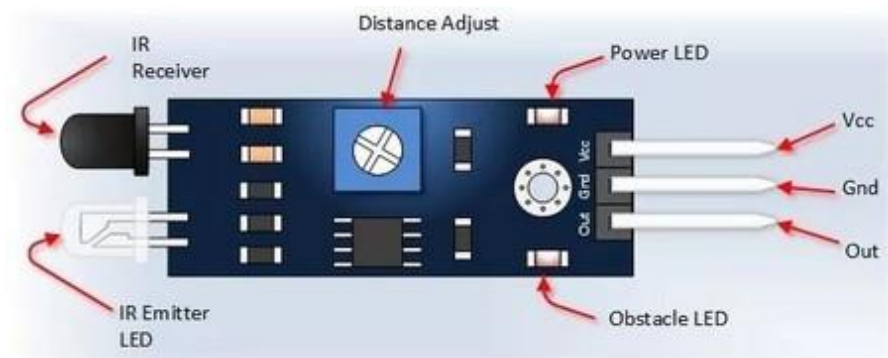
**Figura 3 - Sinal PWM**

Fonte: < <https://www.citisystems.com.br/pwm/> >.

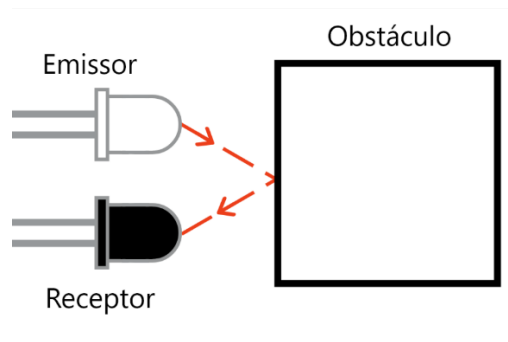
Acessado em: 20 mar 2019.

### 2.3 – SENSOR DE OBSTÁCULO REFLEXIVO INFRAVERMELHO IR

O sensor de obstáculo reflexivo infravermelho IR é um dispositivo que emite um feixe de luz infravermelho pelo emissor, que ao passar algum objeto que não seja da cor preta, reflete o feixe de luz para o fotodiodo, identificando o objeto e emitindo um sinal de nível lógico baixo, sendo possível ajustar pelo potenciômetro de precisão a distância da sensibilidade do sensor, tendo uma faixa de 2 a 30 cm para ajuste de acordo com a necessidade, é possível observar as características físicas do sensor na figura 4 e na figura 5 uma ilustração da lógica de funcionamento do mesmo.

**Figura 4 - Sensor de obstáculo reflexivo**

Fonte:< <https://arduinoeasy.wordpress.com/aplicacoes/sensor-infravermelho-de-obstaculo-com-lm393/> >. Acessado em: 20 mar 2019.

**Figura 5 - Lógica de funcionamento**

Fonte: < <http://mundoprojetado.com.br/sensor-de-obstaculo-infravermelho/>>.

Acessado em: 20 mar 2019.

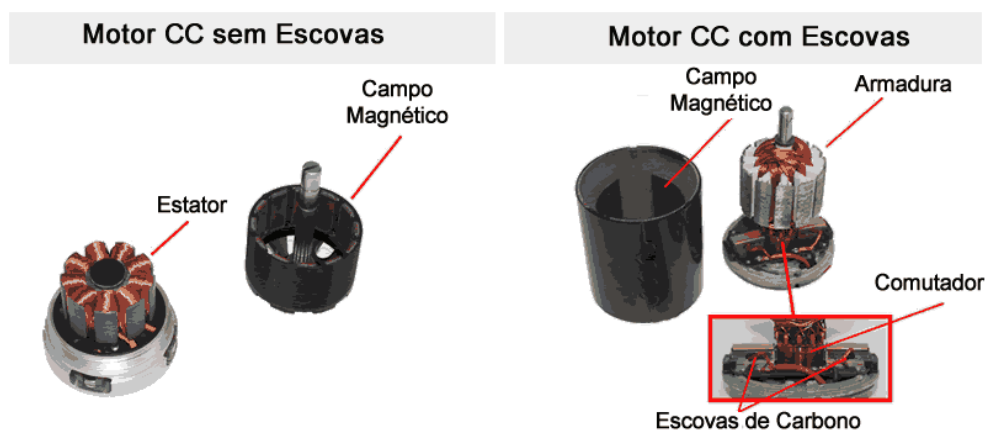
## 2.4 – MOTOR CC

Os motores CC (Corrente Contínua), são dispositivos eletromecânicos que utilizam os princípios do eletromagnetismo para gerar movimento em um eixo, por meio da atração e repulsão dos campos magnéticos, ocasionando em uma rotação constante, desde que se mantenha a alimentação e sentido de fluxo de corrente estáveis. Há vários tipos e categorias de motores CC, onde é necessário avaliar quais os principais aspectos de cada aplicação para ser escolhido o motor mais indicado, eles podem variar de tensão de operação, curva torque x velocidade, com ou sem escovas e demais fatores construtivos. Porém em comparação com os motores CA (Corrente Alternada), os motores CC são mais práticos em termos de controlar a sua velocidade, onde é necessário apenas variar o nível de tensão de entrada para alterar a rotação do mesmo, já no motor CA é necessário variar a frequência, sendo necessário um circuito mais complexo e oneroso para a operação.

Devido a estes fatores os motores CC são utilizados em uma grande variedade de aplicações, pois existem micromotores CC que consomem um nível muito baixo de corrente e possui um alto torque para o seu tamanho devido a uma caixa de redução, e a motores CC de alta velocidade como os Brushless. Alguns dos principais motores CC são:

- Motores de Derivação
- Motores Bobinados em Série
- Motores Bobinados Compostos
- Motores CC de ímã permanente
- Motores CC com armadura em forma de disco
- Motores CC sem Núcleo

Figura 6 - Motor CC com e sem escova



Fonte: < <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/> >.

Acessado em: 20 mar 2019.

## 2.5 – SISTEMAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle consistem em obter uma saída desejada a partir de uma entrada conhecida pelo sistema, onde é possível alterar o valor da entrada e sua saída corresponderá proporcionalmente em condições ideais para se adequar ao novo valor, havendo a possibilidade de surgimento de perturbações estando inerente ao próprio sistema ou de fatores externos, dependendo da grandeza da perturbação ou da frequência, pode não ser possível obter resultados satisfatórios, entretanto, quando se trata de sistemas construídos pelo homem, onde é possível mensurar os seus valores e manipula-los, geralmente se obtém ótimos resultados, seguindo as metodologias corretas para cada sistema.

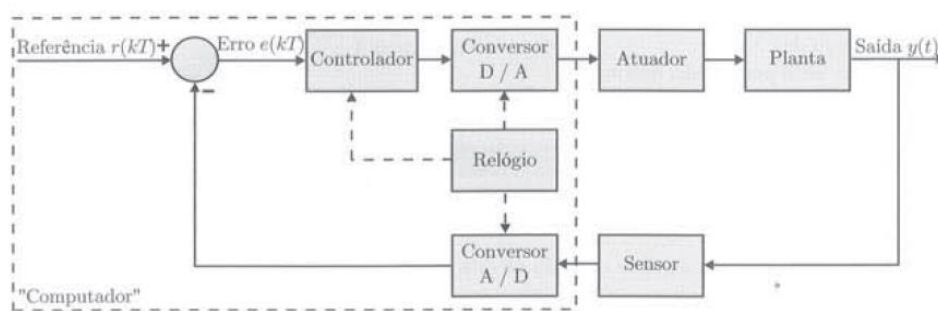
Devido aos sistemas de controle serem empregados na grande maioria das ciências, foram surgindo metodologias específicas para cada tipo de sistema, assim como foram evoluindo as tecnologias, foram também surgindo novos métodos de controle, onde são divididos em dois grandes grupos, denominados de controle moderno e controle clássico.

Quanto a aplicação desses sistemas, é possível ser implementado de duas formas diferentes, no primeiro e antigamente mais utilizado estão os controladores de tempo contínuo, onde são analisados os fenômenos de acordo com a alteração do tempo e os controladores são implementados com a utilização de dispositivos analógicos. O segundo foi utilizado com mais evidência após a grande expansão do mercado dos microcontroladores, onde esses dispositivos operam como componente primordial para a aplicação, estes controladores são chamados de controladores de tempo discreto, devido ao mesmo coletar informações de tempo predefinidos de uma variável, onde são obtidos dados importantes para o cálculo dos parâmetros. Dado ao

fato dos dispositivos microcontrolados serem amplamente difundido e havendo a possibilidade de alterações dos parâmetros do controlador, sem a necessidade de alterações no sistema como um todo, atualmente vem sendo empregado nos controladores modernos nesse modo de implementação, com topologias distintas das clássicas. Hoje, os sistemas de controle encontram aplicação ampla na direção, navegação e controle de mísseis e de naves espaciais, bem como aviões e navios. (NISE, 2002)

Na figura 7 é possível observar a estrutura de um controlador de tempo discreto ou como alguns autores o denominam de controle digital, devido ao mesmo ser implementado dentro de uma plataforma com um microcontrolador, onde possui um conversor A/D (Analógico digital) e D/A (Digital analógico).

**Figura 7 - Sistema de controle digital**

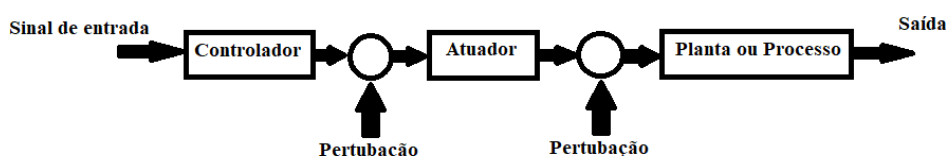


Fonte: CASTRUCCI, 2011, p.382

### 2.5.1 – Sistemas de controle de malha aberta e fechada

Os sistemas de controle podem apresentar além das características já mencionadas, duas formas de ser alocadas no sistema, sendo a mais básica há de malha aberta, onde o sistema está apenas analisando o sinal de entrada e realizando a operação de controle da variável de saída, sem observar o seu estado, não podendo ajustar o valor com o surgimento de perturbações. Um diagrama desse modelo de controlador pode ser observado na figura 8, logo a seguir.

**Figura 8 - Sistema de controle de malha aberta**

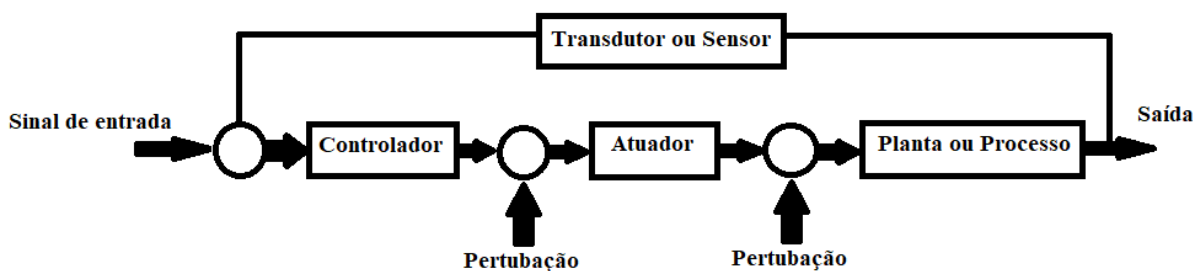


Fonte: Autoria Própria

Com os sistemas de malha fechada ou denominados sistemas com retroalimentação, estes por sua vez podem observar a variável de saída e com o ajuste adequado alterar corretamente os parâmetros para obter um valor idêntico ou muito próximo do sinal de entrada ou referência desejada.

Isto é possível justamente pela utilização de um transdutor ou dispositivo de medição, onde o mesmo realiza a leitura da variável de saída e manda a informação para o controlador, onde faz o comparativo do sinal de entrada com o sinal de saída, estando com o sinal de erro zero, onde o sinal de erro é o sinal de entrada, menos o valor da saída, não são necessários ajustes, porém quando existe uma diferença entre os sinais, seja positivo ou negativo, o controlador alterar a variável de controle para anular ou inibir esse erro. Um diagrama desse modelo de controlador pode ser observado na figura 9, logo a seguir.

**Figura 9 - Sistema de controle de malha fechada**



Fonte: Autoria Própria

Controlar a saída de uma planta ou de um processo por realimentação significa aplicar na sua entrada, após conveniente amplificação, o sinal resultante da diferença entre o valor desejado e o valor medido da saída. (CASTRUCCI, 2011)

### 2.5.2 – Modelagem matemática

Para aplicar um controlador em um sistema é preciso representá-lo em um modelo matemático, para assim obter os dados necessários para os cálculos dos controladores e simular os seus parâmetros. Os dados são obtidos a partir da curva de reação da aplicação do sinal de entrada conveniente ao sistema, com uma análise gráfica é encontrado parciais dos tempos de reação do sistema ao sinal imposto.

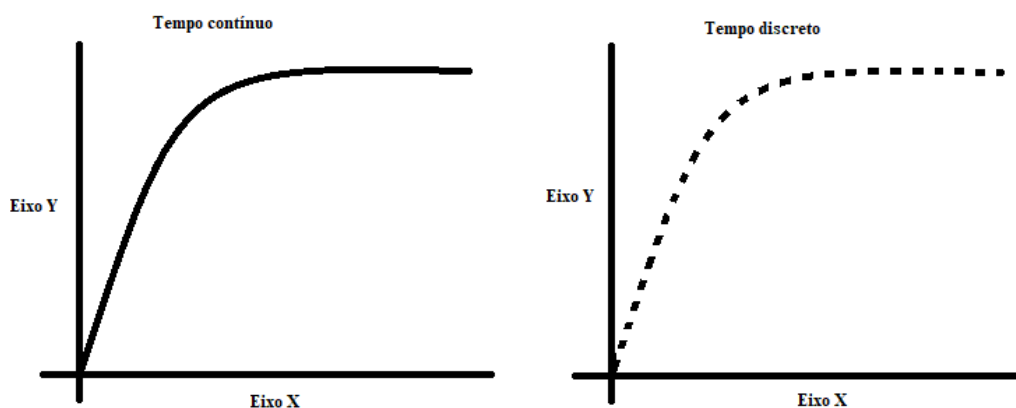
### 2.5.3 – Tempo de amostragem

Com uma aplicação de controle digital é necessário o tempo de amostragem, devido ao controlador em tempo discreto coletar informações em instantes de tempo, com o tempo de amostragem correto o sistema não fica subamostrado, que é ocasionado por um tempo de amostragem muito alto, onde tem perda de informações do sistema e nem tão pouco superamostrado que é justamente o oposto, onde tem um tempo de amostragem muito baixo e pode torna o sistema muito complexo de representá-lo matematicamente.

### 2.5.4 – Discretização

Com o sistema e o controlador sendo coletado informações e obtido sua função de transferência em tempo continua, ou seja, no domínio do plano S é necessário discretizar a função de transferência, trazendo o sistema e o controlador para o plano Z. Onde é possível implementar em uma plataforma eletrônica e controlar o processo ou planta do sistema. Na figura 10 é possível visualizar uma comparação entre duas curvas, a primeira sendo em tempo contínuo e a segundo em tempo discreto, tendo como intervalo entre as coletas o tempo de amostragem.

Figura 10 - Gráfico de comparação continua e discreto



Fonte: Autoria Própria

## 2.6 – SISTEMAS SUPERVISÓRIOS

Os sistemas industriais necessitam de um nível de atenção às suas variáveis de processo bastante elevado, devido ao fato de poder expor os operários há correrem risco de vida se algo estiver fora dos padrões, como também podem prejudicar todo um lote da produção em caso de não haver um controle adequado. Com essas perspectivas e com o avanço da tecnologia que possuíamos, foi possível implementar um sistema, onde é realizado a leitura de uma variável de processo em tempo real, sendo exibida em uma tela e podendo realizar a manipulação de comandos para ajustar algum parâmetro, caso este esteja fora da faixa ideal. Esses sistemas de supervisão foram denominados de SCADA/HMI (Supervisory Control and Data Acquisition / Human-Machine Interface). Com a aplicação de SCADA/HMI é possível obter algumas vantagens que influenciam diretamente na melhoria do sistema em termos gerais, entre eles podemos citar:

- Análise de tendência;
- Alarmes;
- Operação remota no processo;
- Geração de relatórios gráficos;

Com o monitoramento correto e um sistema de controle apropriado a partir das informações geradas em tempo real, permite identificar falhas e consequentemente otimizar as tomadas de decisão para manter a planta ou processo em operação de forma adequada e segura. Na figura 11 é possível observar um sistema de supervisorio.

**Figura 11 - Sistema supervisorio**

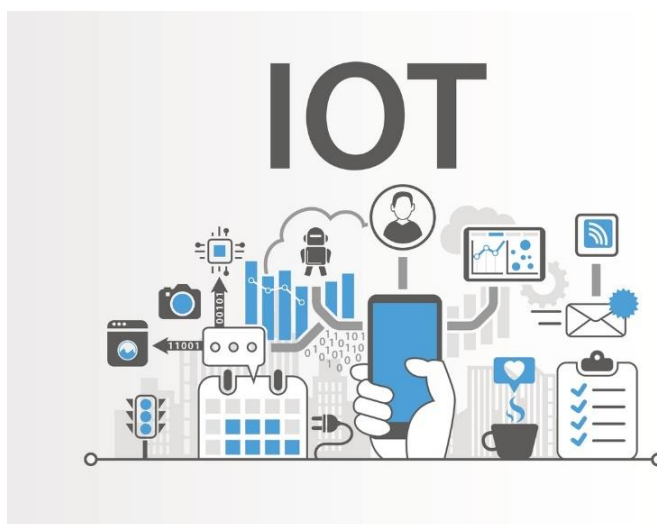


Fonte: <<https://www.elipse.com.br/produto/elipse-plant-manager/>>. Acesso em: 02 mar 2019.

### 2.6.1 – Aplicação Mobile

Com o mundo estando cada vez mais conectado, e com as informações estando acessível em qualquer lugar do mundo, hoje é possível monitorar um sistema sem estar próximo ao processo. Com o surgimento da IOT (Internet of Things), onde todos dados e informações podem ser alocados na nuvem, podendo ser exibida ou manipulada pelo usuário, surgiu uma grande gama de possibilidades possíveis em aplicações tantas industriais quanto acadêmicas. Na figura 12 é ilustrado de forma didática algumas possibilidades com a IOT.

**Figura 12 - Internet of Things**



Fonte: <<https://www.seucondominio.com.br/noticias/otimizando-a-gestao-condominial-com-a-iot-internet-of-things>>. Acesso em: 02 mar 2019

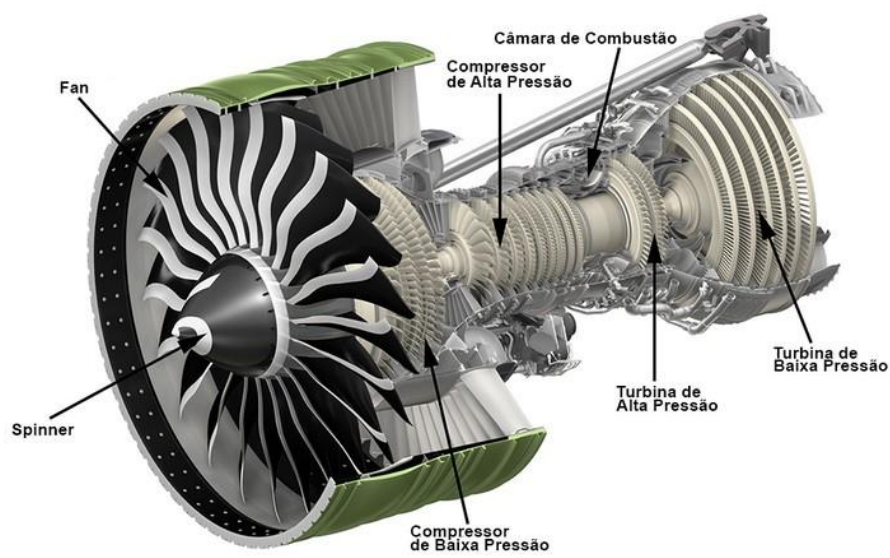
## 2.7 – MOTOR A REAÇÃO

É comum chamar o motor de um avião ou jato em apenas de turbina, porém a denominação correta é motor a reação, onde pela 3ª lei da física, Newton afirma que toda força exercida em um sentido à uma reação de mesma intensidade, mas em sentido oposto. A partir desse princípio, os motores de um avião utilizam a força gerada pelos ventos para gerar um empuxo, que o desloca para frente o avião. O motor a reação convencional detém de três partes principais, a primeira é o compressor, onde existe o de alta e baixa pressão, parte responsável por comprimir o ar que é admitido no sistema consequentemente aumentado a pressão, a segunda é a câmara de combustão onde é realizada a queima do combustível com o ar comprimido e por fim no terceiro e último estágio, está a turbina onde existe a de alta e baixa,



o vento agora de ar quente e de alta pressão faz girar a turbina, aproveitando a energia cinética gerada pelos gases para gerar energia mecânica. Após essas etapas o ar se expande e esfria, e por então sai do motor pelo bocal propulsor, criando o impulso que movimenta o avião para frente. Na figura 13 é possível visualizar as partes principais de um motor a reação.

**Figura 13 - Motor a reação**

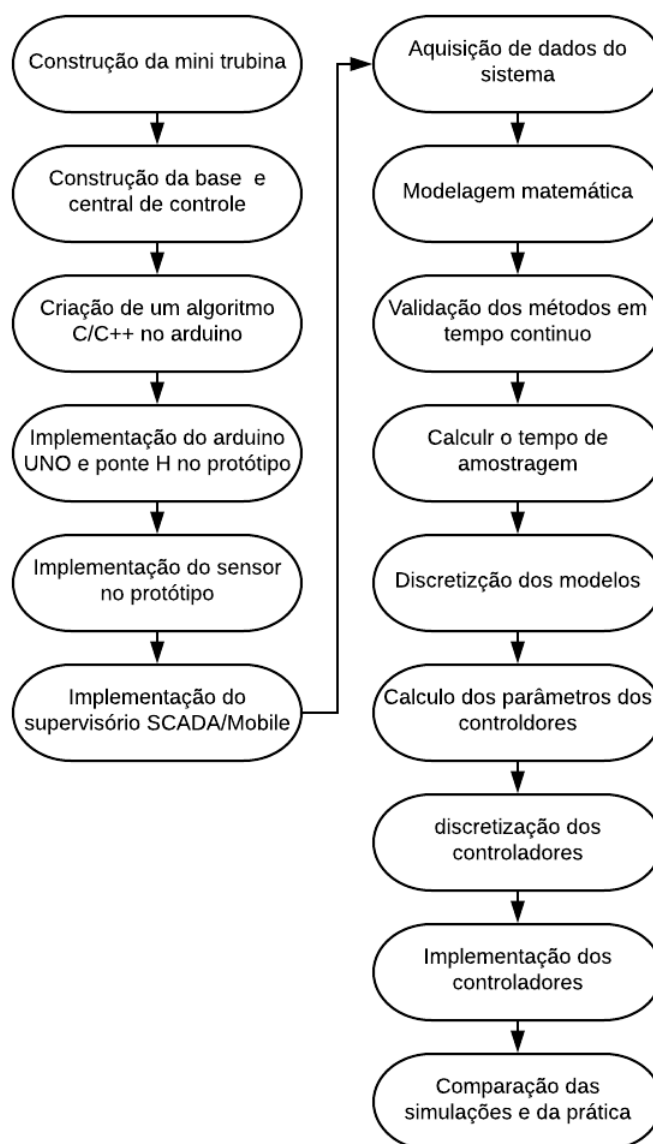


Fonte: < [https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/onde-esta-turbina\\_3402.html](https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/onde-esta-turbina_3402.html) >. Acesso em: 31 mar 2019.

### 3 - METODOLOGIA

Neste capítulo será abordado a parte metodológica do projeto, onde será descrito os passos que sucederam da concepção da ideia, até a obtenção dos resultados. A figura 14 ilustra de forma clara a sequência lógica das etapas de realização do projeto, onde a primeira coluna exibe os passos da parte construtiva do sistema físico e da implementação do algoritmo no sistema, já na segunda coluna exibe a parte dos passos seguidos para a realização e implementação dos controladores.

**Figura 14 - Fluxograma da metodologia**



Fonte: Autoria Própria

Primeiramente foi obtido o layout da mini turbina no site [www.fernandok.com](http://www.fernandok.com), após isso foi realizado a impressão 3D das peças em material ABS, para um melhor acabamento das mesmas, foram lixadas superficialmente. Com as peças devidamente lixadas e limpas, foi aplicado uma camada de tinta spray nas peças e em específico na hélice foram pintando 4 faixas pretas na parte interna para o sensor realizar a contagem de quantos pulsos por minutos ele teria, então finalmente foi realizado o acoplamento do motor CC e fixando o sensor de obstáculo infravermelho, finalizando a parte construtiva da mini turbina. Estas etapas podem ser observadas nas figuras 15, 16, 17 e 18 respectivamente.

**Figura 15 - Peças lixadas**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 16 - Peças pintadas**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 17 - Peça com o motor e sensor**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 18 - Mini turbina montada**

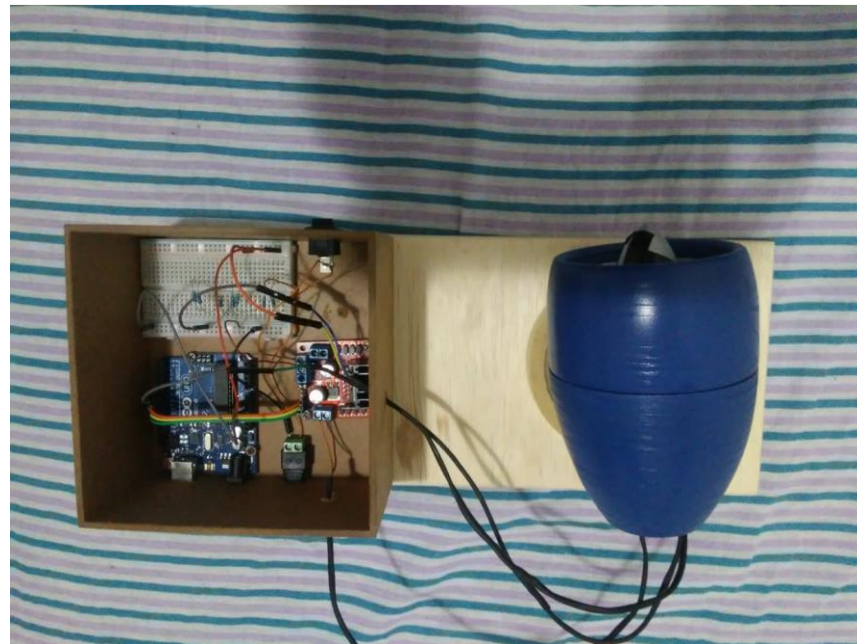


Fonte: Autoria Própria

Após a conclusão da mini turbina foi iniciado o processo de construção de uma base para suporta a mesma e alocar os componentes eletrônicos que fossem necessários para controlar e realizar o processamento dos dados. Com a mini turbina finalizada foi construído um algoritmo para ser implementado no Arduino UNO que fosse capaz de realizar as leituras e fazer o processamento dos dados, exibindo o RPM da mini turbina e o sinal PWM aplicado. Com uma peça de madeira de 14,5 cm x 35 cm e uma caixa de mdf de 14 cm x 14 cm x 9 cm foram alocados os componentes Arduino UNO, ponte H L298N, protoboard, botão On/Off, conector p4 fêmea e 4 LEDs. A figura 19 exibe a caixa.

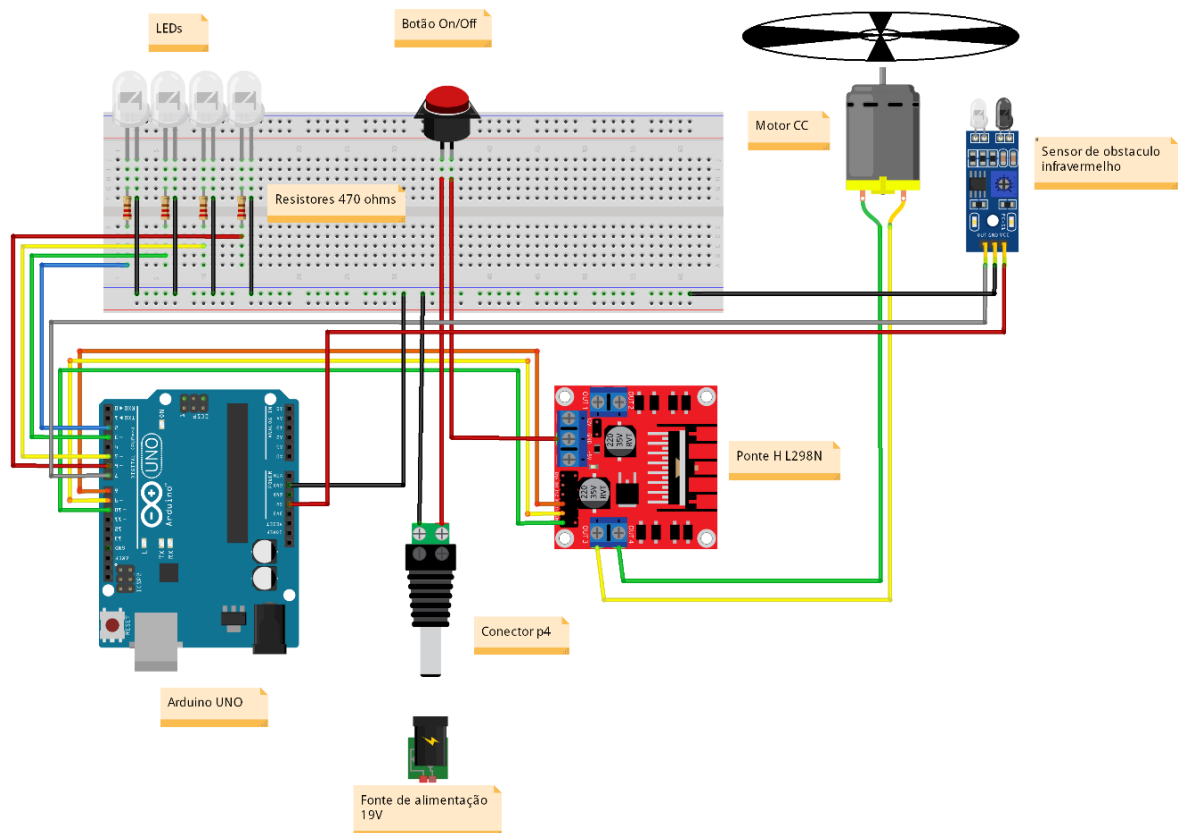
Com a base finalizada foi feito a ligação elétrica dos componentes, onde todos estão interligados de forma adequada para o devido funcionamento do sistema. Na figura 20 é possível observar de forma mais clara o esquema elétrico realizada e como estão posicionados os componentes.

**Figura 19 - Base e mini turbina**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 20 - Esquema elétrico do protótipo**



Fonte: Autoria Própria

Após o sistema realizar as leituras do sensor e exibi-las no monitor serial da IDE do Arduino, foi feita uma comparação da leitura do sensor de obstáculo infravermelho com um tacômetro digital da Ininipa MDT-2245B, apresentando uma ampla faixa de medida de 0,5 a 20,000 RPM e uma resolução de 0.1 para RPM <999 e 1 RPM para  $\geq 1000$ .

**Figura 21 - Tacômetro**



Fonte: Acervo Pessoal

**Tabela 1 – Comparação dos sensores**

PWM	Tensão	Sensor Óptico	Tacômetro
50	5.53 V	2265 RPM	2163 RPM
100	11.37 V	4531 RPM	4680 RPM
150	14.08 V	5663 RPM	5769 RPM
200	15.67 V	6230 RPM	6389 RPM
250	16.83 V	6796 RPM	6831 RPM

Após aferir o sensor e constatar o pleno funcionamento das leituras, tendo como observação que em rotações acima de 6200 RPM o sensor passa a ter menos precisão nas leituras, e quando chega a 6500 RPM foi possível perceber que mesmo aumentando o sinal PWM o sensor não detectou as alterações na rotação, sendo necessário muito o valor de PWM para o sensor perceber a alteração.

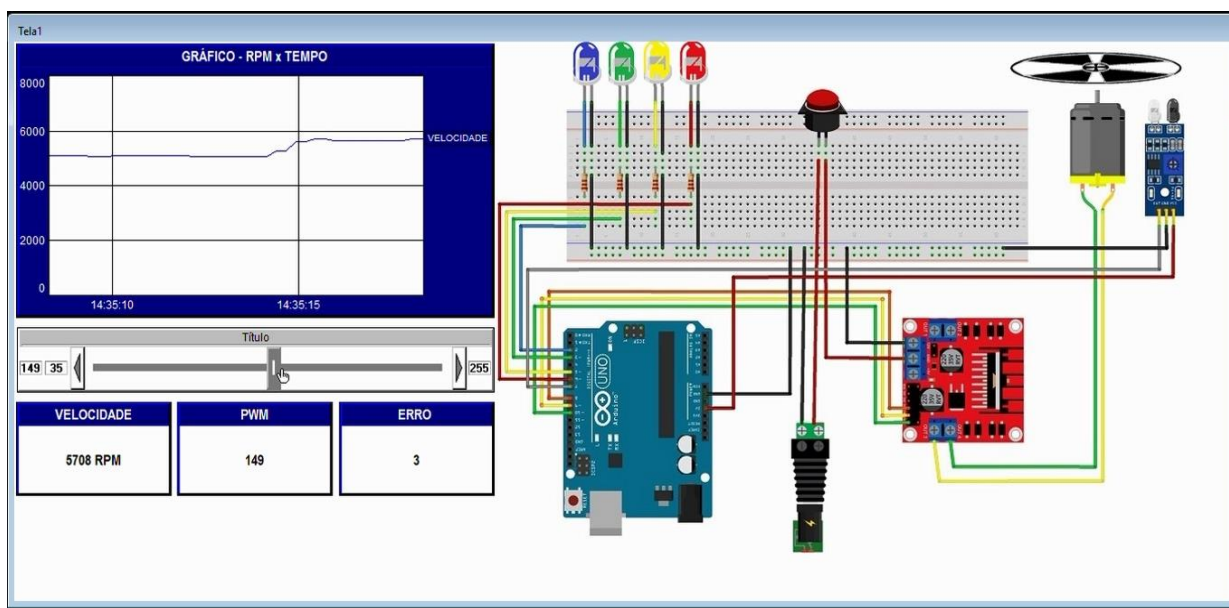
Com o sistema em pleno funcionamento foi implementado ao mesmo um supervisório SCADA/Mobile da empresa Elipse Software, onde são necessários dois softwares distintos da empresa, o primeiro sendo o Elipse SCADA para realizar a comunicação com a porta serial, via protocolo Modbus. Onde é possível ler e escrever nas variáveis a qual foram relacionados corretamente no algoritmo na IDE do Arduino e no supervisório. O segundo software é o Elipse Mobile onde este realiza a comunicação com o Elipse SCADA e obtém os dados necessários para a leitura e escrita via internet, selecionando corretamente as variáveis do Elipse Mobile com as do Elipse SCADA. A aplicação realizada neste projeto foi feita na mesma rede, porém este software tem a capacidade de operar estando o sistema e o supervisório em redes distintas,



e também há a possibilidade de realizar a comunicação direta com o Arduino, sem a necessidade de um supervisor no microcomputador que esteja conectado. Com a aplicação Demo do Elipse Mobile só é possível utilizar duas variáveis para leitura ou escrita, estando conectado via um supervisor entre o Elipse Mobile e o Arduino como neste projeto, e no Demo do Elipse SCADA só é possível utilizar dez variáveis para leitura e escrita.

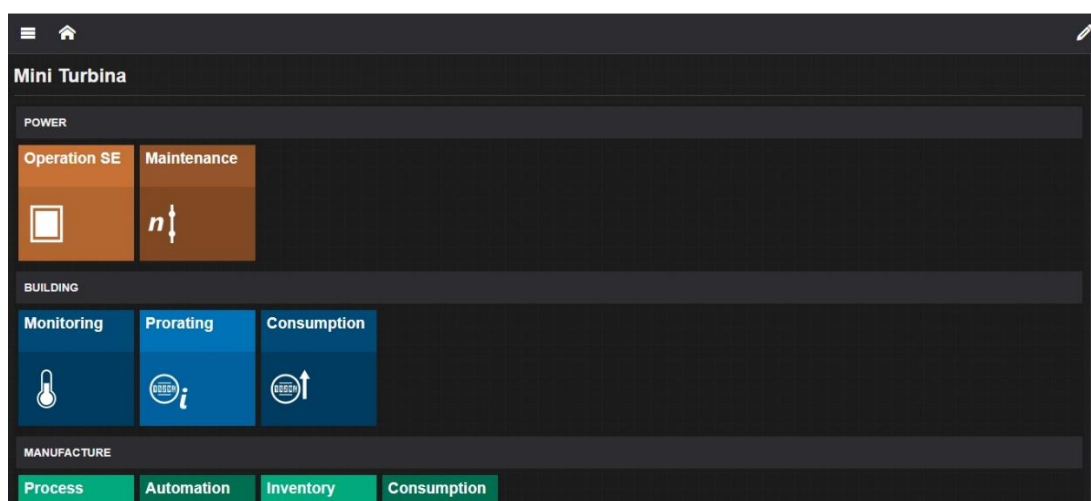
Tendo as características acima citadas foi realizado a construção de um supervisor SCADA/Mobile pelos softwares da Elipse de forma que fosse possível ler a rotação da mini turbina e escrever um novo valor de sinal PWM enviado para a mesma, alterando a sua velocidade. Na figura 22 é possível visualizar a configuração do supervisor criado no Elipse SCADA, onde a esquerda da figura encontra-se as informações gráficas do sistema, como também o curso para alterar o sinal PWM a ser enviado para a ponte H, no lado direito está o esquema elétrico, contendo todos os componentes eletrônicos do sistema, tendo os LEDs azul, verde, amarelo e vermelho como indicador visual nas mesmas faixas de rotação como no projeto físico.

**Figura 22 - Supervisor Elipse SCADA do sistema**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 23 - Supervisório Elipse Mobile do sistema**

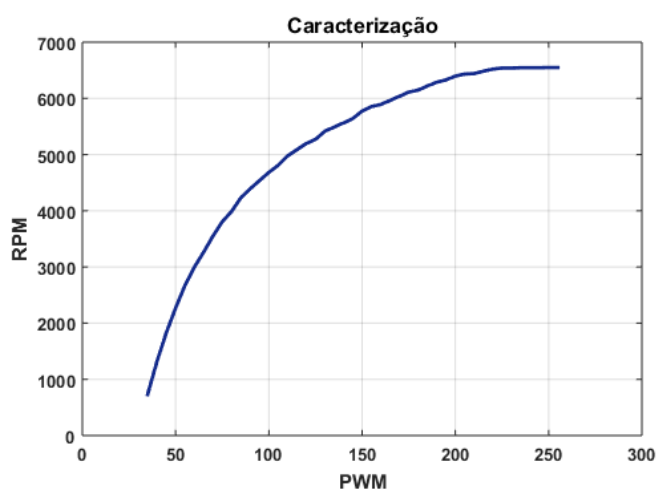


Fonte: Autoria Própria

Com o supervisor estando funcionando corretamente, tanto no supervisor local, quanto no mobile, foi dado o início da parte de controle do projeto, tendo como primeiro passo a aquisição de dados do sistema, assim como foi fundamentado no capítulo 2, adquirindo a curva RPM x PWM, onde é possível caracterizar o sistema, sabendo a sua faixa de operação.

Foi aplicado sinal PWM na ponte H L298N que começou do valor mínimo que o motor partia em vazio, sendo 35 e aumentando este valor em 5 até o limite máximo que é de 255, sendo o valor de 0 PWM = 0% do duty cycle e 255 PWM = 100% do duty cycle, devido ao Arduino ter uma saída digital de 8 bits. No software Matlab foi gerado o gráfico que representa a caracterização do sistema, sendo visualizada na figura 24.

**Figura 24 - Caracterização do sistema**



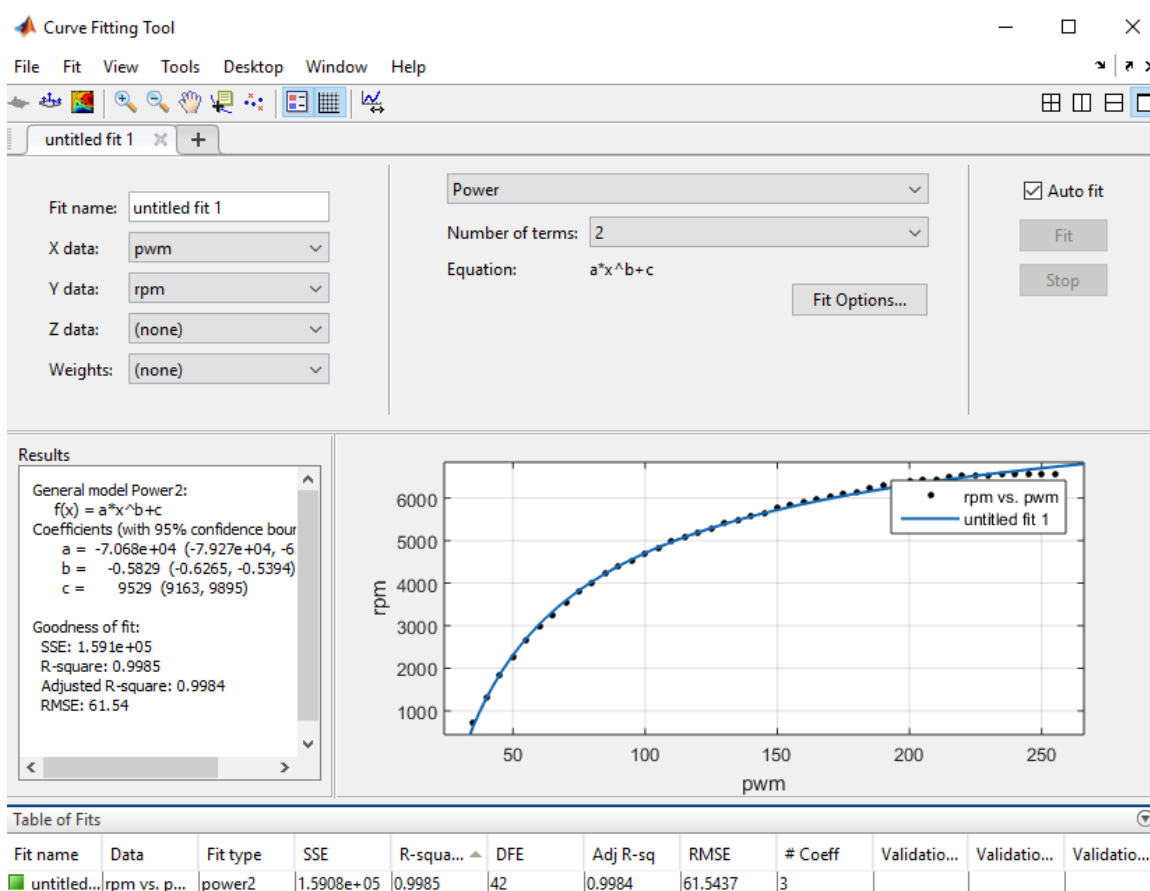
Fonte: Autoria Própria



Com o levantamento da curva foi possível perceber que ao passar dos 200 PWM não teve uma linearização como nos valores abaixo, sendo uma região mais complexa de realizar o controle, devido a necessitar de métodos não-lineares ou de métodos não convencionais. Foi então escolhido a faixa de 50 PWM até 180 PWM para realizar a continuidade do projeto, onde corresponde respectivamente 2269 RPM e 6147 RPM, está é a rotação mínima e máxima que o controlador vai operar, fora desta faixa o controlador não respondera como desejado.

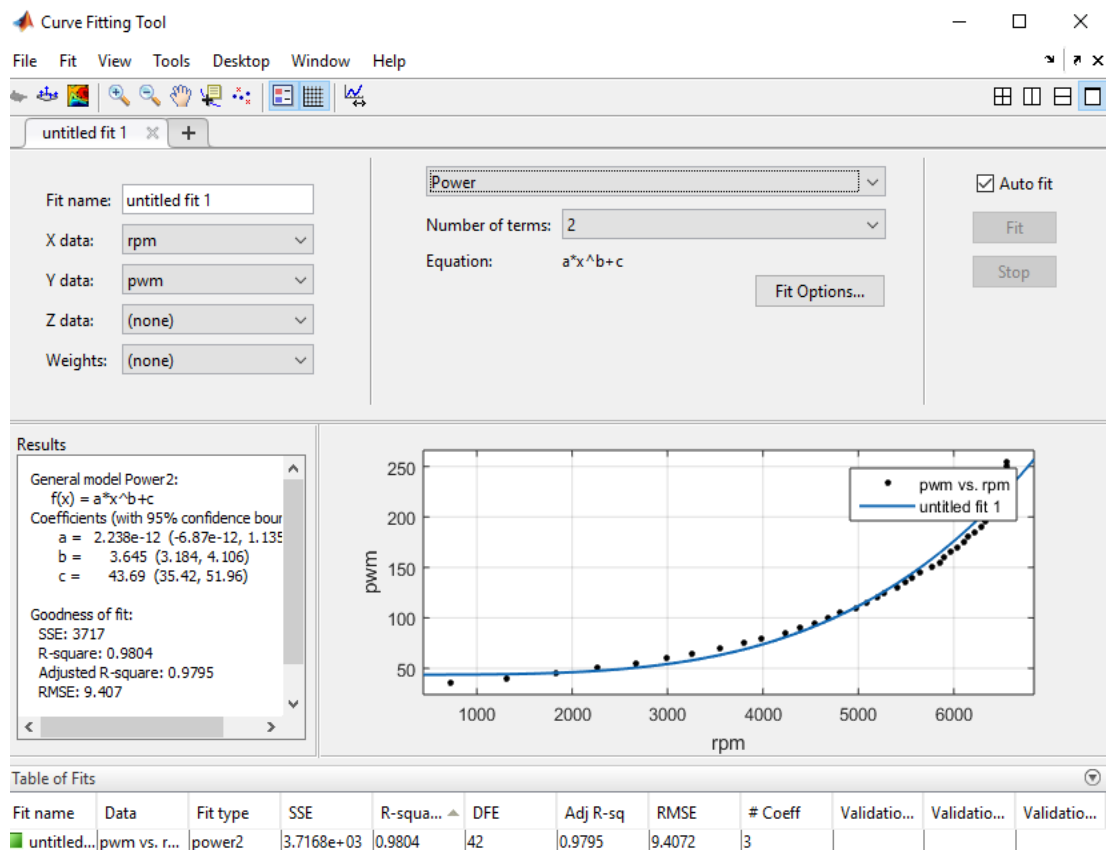
Com a faixa de trabalho determinada, foi adquirido uma equação que converte o valor de RPM para PWM e outra equação que converte o valor de PWM para RPM, estas 2 equações de conversões foram obtidas via software Matlab, estas equações são fundamentais para o controlador poder realizar a leitura do valor desejado de RPM e aplicar um sinal de PWM equivalente para obter a velocidade de referência e saber com a leitura do sensor qual o valor de erro se houver. Nas figuras 25 e 26 é possível visualizar as equações das curvas de conversão.

**Figura 25 - Equação PWM para RPM**



Fonte: Autoria Própria

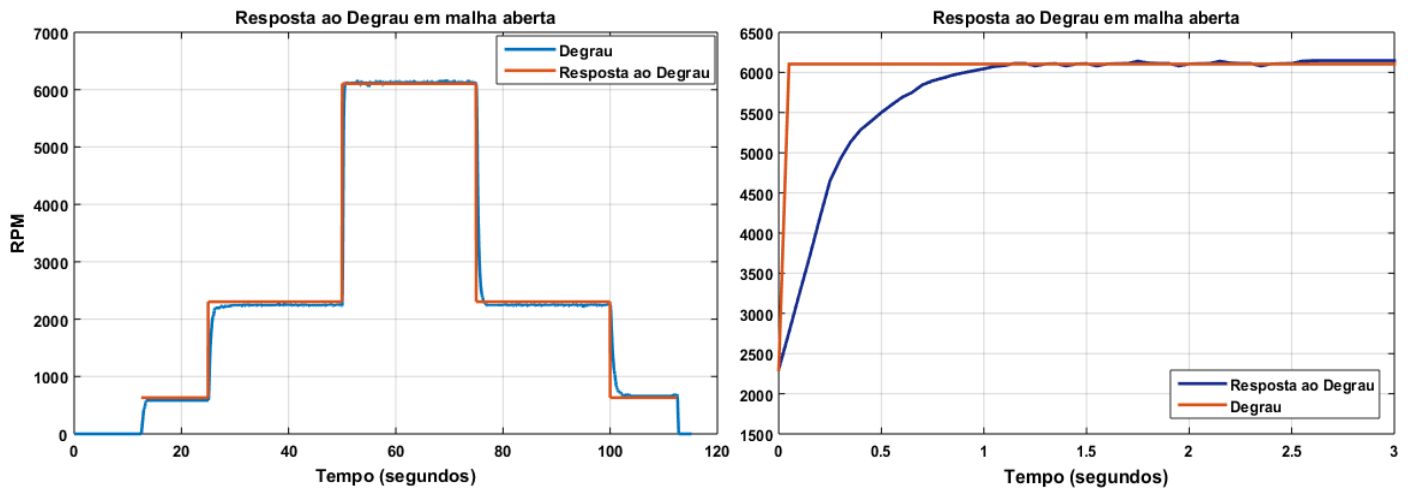
**Figura 26 - Equação RPM para PWM**



Fonte: Autoria Própria

Com as equações obtidas foi aplicado um sinal de entrada do tipo degrau para ver a curva de reação do sistema ao sinal imposto. Para uma melhor resposta do degrau foi aplicado inicialmente um valor de PWM onde o sistema sai da inercia e permanece na faixa mínima de operação e então é aplicado o valor de 50 PWM por 25 segundos, onde é possível ver que a rotação está estável com algumas pequenas alterações na leitura, após esse tempo é aplicado um valor de 180 PWM por 25 segundos e após isso é aplicado novamente o valor mínimo da faixa de controle, 50 PWM por 25 segundos, e finalizando com a saída do sistema da faixa de controle e chegando na região mínima de operação e por fim desligando o sistema. Essa operação é possível visualizar na figura 27 que foi gerada pelo software Matlab, onde tem a curva gerada pelos dados coletados do sistema via leitura serial do Arduino, a utilização deste método foi aplicada tanto no degrau quanto na caracterização.

**Figura 27 - Resposta do sistema a entrada do tipo degrau**



Fonte: Autoria Própria

Com a resposta do sistema a uma entrada do tipo degrau obtida, é possível notar que o sistema é de 1º ordem e com atraso desprezível, foi então modelado o sistema pelos métodos de Smith, Sundaresan-krishnaswamy e Broida onde são utilizados instantes de tempos distintos para gerar uma função de transferência que seja muito próxima do sistema real, essa metodologia é gráfica e tem como objetivo auxiliar na construção do controlador como fundamentado no capítulo 2. Pelos métodos aplicados, é necessário calcular o ganho estático  $K$ , que é obtido pela fórmula 3.1 e o  $\tau$  que é obtido de acordo com cada metodologia, essas informações são utilizadas na formula 3.2 para gerar o modelo matemático.

$$K = \frac{Y_{final} - Y_{inicial}}{U_{final} - U_{inicial}} = \frac{\Delta y}{\Delta U} \quad (3.1)$$

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (3.2)$$

Onde:

$Y_{final}$  e  $Y_{inicial}$  são os valores da resposta do sistema;

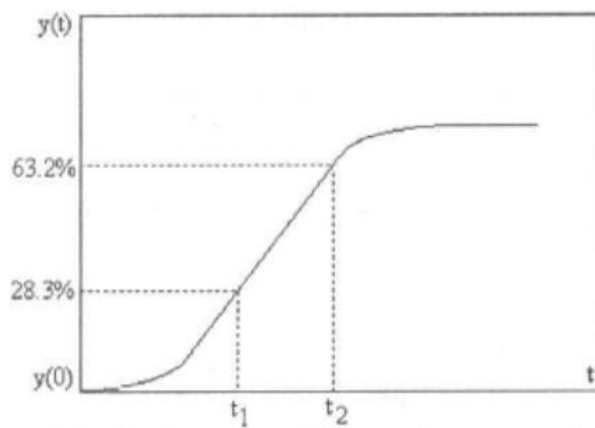
$U_{final}$  e  $U_{inicial}$  são os valores do sinal entrada do sistema.

Pelos valores da figura 27 e aplicado na fórmula 3.1 foi obtido o ganho estático do sistema, representado pela fórmula 3.3.

$$K = \frac{6111 - 2232}{6103 - 2302} = 1.0 \quad (3.3)$$

Pelo método de Smith, é necessário encontrar T1 e T2 que equivale respectivamente ao tempo de 28,3% e 63,2% do valor para o sistema atingir o regime permanente. Essas informações são utilizadas na fórmula 3.4, que de acordo com os valores da figura 27 é obtido a equação 3.5. Na figura 28 é possível ver a aplicação do método.

**Figura 28 - Método de Smith de 1º ordem**



Fonte: Coelho e Coelho (2004)

$$\tau = 1.5 \cdot (T_{63,2\%} - T_{28,3\%}) \quad (3.4)$$

$$\tau = 1.5 \cdot (0,255 - 0,110) = 0,217 \quad (3.5)$$

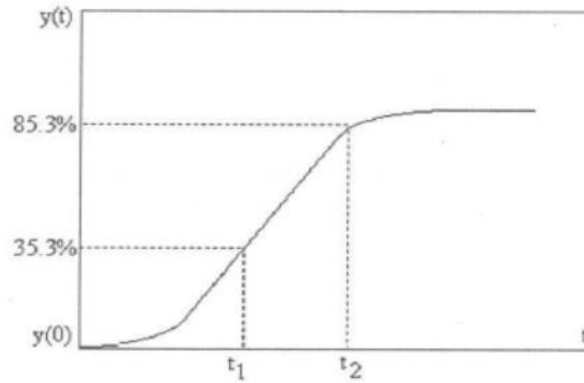
Substituindo os valores obtidos nas equações 3.3 e 3.5 na equação 3.2 é obtido a equação que representa o sistema pelo método de Smith de Primeira Ordem.

$$G_s(s) = \frac{1,0}{0,217s + 1} \quad (3.6)$$

Pelo método de Sundaresan-Krishnaswamy é necessário encontrar T1 e T2, porém esses com 35,3% e 85,3% respectivamente do valor para o sistema atingir o regime permanente da

resposta. Essas informações são utilizadas na fórmula 3.7, que de acordo com os valores da figura 27 é obtido a equação 3.8. Na figura 29 é possível ver a aplicação do método.

**Figura 29 Método de Sundaresan-Krishnaswamy**



Fonte: Coelho e Coelho (2004)

$$\tau = 0,67 \cdot (T_{85,3\%} - T_{35,3\%}) \quad (3.7)$$

$$\tau = 0,67 \cdot (0,5210 - 0,1388) = 0,256 \quad (3.8)$$

Substituindo os valores obtidos nas equações 3.3 e 3.8 na equação 3.2 é obtido a equação que representa o sistema pelo método de Sundaresan-Krishnaswamy.

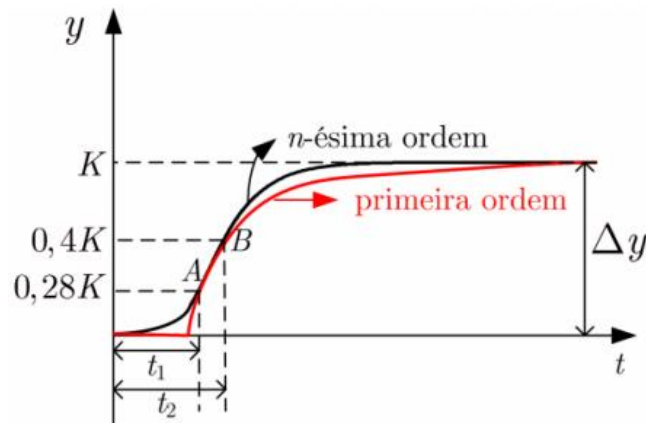
$$G_{sk}(s) \frac{1,0}{0,256s + 1} \quad (3.9)$$

Pelo método de Broida, é necessário encontrar  $T_1$  e  $T_2$  que equivale respectivamente ao tempo de 28% e 40% do valor para o sistema atingir o regime permanente da resposta, e multiplica-los pelo ganho estático. Essas informações são utilizadas na fórmula 3.10, que de acordo com os valores da figura 27 é obtido a equação 3.11. Na figura 30 é possível ver a aplicação do método.

$$\tau = 5,5 \cdot (T_{40,0\%} \cdot K - T_{28,0\%} \cdot K) \quad (3.10)$$

$$\tau = 5,5 \cdot (0,1580 - 0,1090) = 0,269 \quad (3.11)$$

**Figura 30 - Método de Broida**

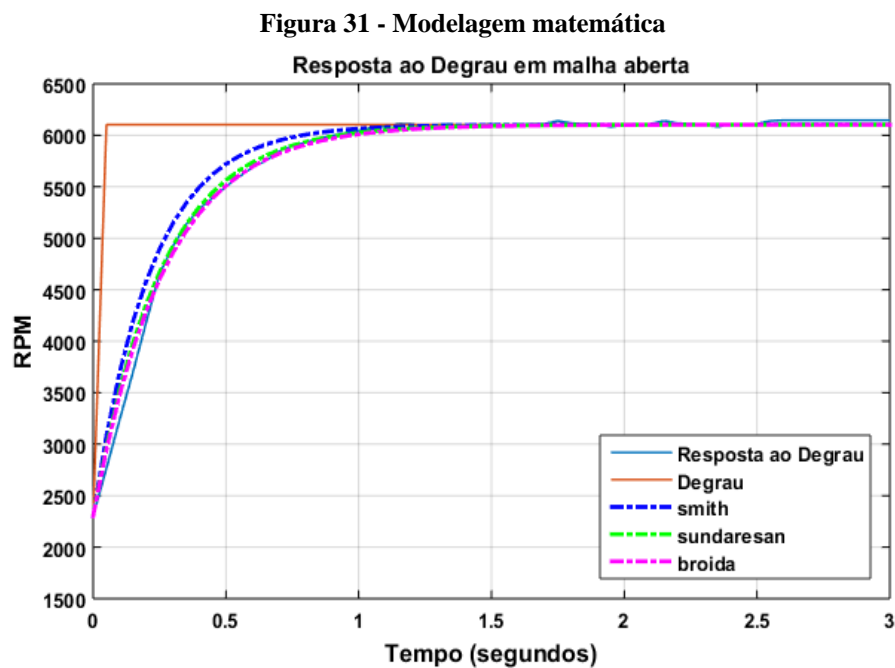


Fonte: (A. SCALASSARA P. R., 2007)

Substituindo os valores obtidos nas equações 3.3 e 3.11 na equação 3.2 é obtido a equação que representa o sistema pelo método de Sundaresan-Krishnaswamy.

$$G_{Br}(s) = \frac{1,0}{0,269s + 1} \quad (3.12)$$

Na figura 31 são observados os gráficos gerados pelas modelagens de Broida, Smith de Primeira Ordem e Sundaresan-Krishnaswamy.



Fonte: Autoria Própria

Após o procedimento de modelagem matemática é necessário validar qual dos métodos apresenta o melhor desempenho, onde é utilizado a fórmula 3.13 para realizar essa identificação quantitativa. O método utilizado para validação é o MRSE (Mean Relative Squared Error – média relativa do erro quadrático):

$$MRSE = \left( 1 - \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2}{\sum_{k=1}^N (y(k))^2}} \right) \cdot 100 \quad (3.13)$$

Onde:

$y(k)$  = saída do sistema;

$\hat{y}(k)$  = modelo a ser validado;

Foi aplicado a fórmula 3.13 para as equações 3.6, 3.9 e 3.12 pelo software Matlab, onde os valores de cada método é mostrado na tabela 2, com a validação realizada foi escolhido os dois melhores métodos para dar continuidade no projeto.

**Tabela 2 – Validação dos modelos matemáticos**

<b>Método</b>	<b>Funções</b>	<b>MRSE</b>
Smith	$G_s(s) = \frac{1,0}{0,217s + 1}$	83,8180%
Sundaresan- Krishnaswamy	$G_{sk}(s) = \frac{1,0}{0,256s + 1}$	91,1298%
Broida	$G_{Br}(s) = \frac{1,0}{0,269s + 1}$	92,1455%

Como pode ser visualizado na tabela 2 os melhores métodos são Broida e Sundaresan-Krishnaswamy, com a validação concluída é necessário discretizar as funções, assim como foi fundamentado no capítulo 2. Para isto é necessário calcular o tempo de amostragem, onde neste trabalho foi utilizado o método de Isermann-Münchhof, que utiliza a fórmula 3.14 para encontrar uma faixa de valores possíveis para ser utilizado, sendo necessário conhecer o sistema e o sensor para escolher o valor dentro da faixa.

$$\frac{T_{95\%}}{15} \leq t_a \leq \frac{T_{95\%}}{5} \quad (3.14)$$

Com o valor de  $T_{95\%}$  sendo 0,780 segundos de acordo com a figura 27, substituindo esse valor na fórmula 3.14 é obtido a seguinte faixa de valores.

$$0.05 \leq t_a \leq 0.15 \quad (3.15)$$

Como o tempo de resposta do sensor de obstáculo infravermelho no sistema é de 0.05 segundos, esse foi o tempo utilizado para discretizar as funções obtidas na etapa de modelagem matemática. Para a discretização dos modelos foi utilizado a função `c2d` do Matlab, pelo método de ZOH (Zero-Order-Hold) que é um segurador de ordem zero, onde este segurador consiste em manter o valor da amostra pelo período de tempo até a próxima, de acordo com o tempo de amostragem determinado. A equação 3.16 é a função que o representa

$$G(Z) = \frac{Z-1}{Z} \cdot \left( \frac{G(s)}{s} \right) \quad (3.16)$$

Após o procedimento de discretização realizado com as equações 3.9 e 3.12 as equações equivalentes do domínio S para o domínio Z foram respectivamente 3.76 sendo para Sundaresan- Krishnaswamy e 3.18 para Broida.

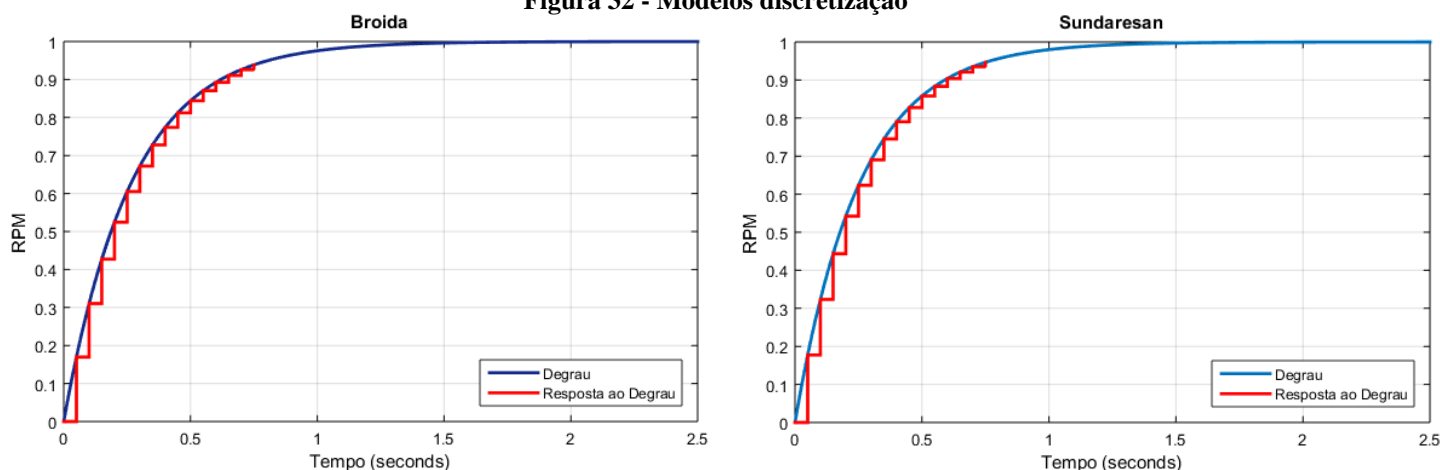
$$G_{skzoh}(Z) = \frac{0.1774}{Z - 0.8226} \quad (3.17)$$

$$G_{brzoh}(Z) = \frac{0.1696}{Z - 0.8304} \quad (3.18)$$

A figura 32 mostra o resultado das discretizações, onde o gráfico do lado esquerdo é a discretização para o método matemática de Broida e no gráfico do lado direito é a discretização para o método matemático de Sundaresan- Krishnaswamy.



Figura 32 - Modelos discretização



Fonte: Autoria Própria

Após a conclusão das discretizações das funções de transferências que representam o sistema dinâmico foi iniciado o processo de cálculos dos parâmetros dos controladores, tendo como controlador PID a ser implementado no sistema dinâmico, onde existem 3 ações dentro desse controlador, a primeira sendo a ação proporcional, que é responsável por realizar um ganho no sistema para diminuir o erro, a segunda sendo a ação integral, que é responsável por eliminar o erro em regime permanente e por fim a ação derivativa, sendo esta a responsável por melhorar o regime transitório do sistema. Para um controlador PID ter o máximo de eficiência em sua função é necessário calcular bem as 3 ações, pois um valor errado pode levar o sistema para a instabilidade ou não funcionar corretamente como esperado. A fórmula 3.19 é a equação do PID em série, tendo também outras metodologias de implementação. A tabela 3 evidencia os efeitos relacionados a cada ação.

$$PID(S) = Kp \left( 1 + \frac{1}{Tis} + Tds \right) \quad (3.19)$$

Sendo:

- $Kp$  a ação proporcional;
- $Ti$  a ação integral;
- $Td$  a ação derivativa.

**Tabela 3 – Efeitos dos termos do controlador PID**

Parâmetro	Tempo de Subida	Sobressinal	Tempo de Estabilização	Erro de Estabilização	Estabilidade
P	Diminui	Aumenta	Sem alteração	Diminui	Degrada
I	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina	Degrada
D	Sem alteração	Diminui	Diminui	Sem alteração	Aumenta quando este termo é pequeno

Existem vários métodos de sintonia de controlador PID, como o sistema dinâmico deste projeto apresenta um comportamento de um sistema com atraso desprezível será utilizado a sintonia por Skogestad, a tabela 4 mostra as regras para a sintonia de cada modelo de função.

**Tabela 4 – Sintonia por Skogestad**

<b>Gp(S)</b>	<b>Kp</b>	<b>Ti</b>	<b>Td</b>
$\frac{K}{s}$	$\frac{1}{K T_c}$	$K \mid T_c$	0
$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{T}{K T_c}$	$\text{Min} [\tau, K \mid T_c]$	0
$\frac{K}{(\tau s + 1)s}$	$\frac{1}{K T_c}$	$K \mid T_c$	$\tau$
$\frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{T_1}{K T_c}$	$\text{Min} [\tau, K \mid T_c]$	$\tau_2$
$\frac{k}{s^2}$	$\frac{1}{(4K (T_c^2))}$	$4T_c$	$4T_c$

Sendo:

- $k_1 = 4$  (valor geralmente utilizado, sendo possível ajustes finos);
- $T_c > 0$ . Sugestão  $T_c = 0,7 \cdot \tau$ ;
- $\tau$  é a constante de tempo da função.

Como a função do sistema dinâmico é de 1º ordem e com atraso desprezível representada pela equação 3.20, é utilizado a segunda linha da tabela 4 para realizar a sintonia

do controlador. É possível notar que como o  $T_d$  é zero e o controlador terá apenas as ações Proporcional e Integral, ele acaba por se tornar um controlador PI.

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (3.20)$$

Será sintonizado um controlador PI para os modelos matemáticos de Broida e Sundaresan, onde pode ser visualizada as suas funções de transferências nas equações 3.21 e 3.22.

$$G_{Br}(s) = \frac{1,0}{0,269s + 1} \quad (3.21)$$

$$G_{sk}(s) = \frac{1,0}{0,256s + 1} \quad (3.22)$$

De acordo com a tabela 4 a equação para encontrar os valores da  $K_p$  e  $T_i$  da equação 3.18 são as equações 3.23, 3.24, 3.25 e 3.26 que representam os cálculos realizados para a modelagem por Broida.

$$K_p = \frac{\tau}{K \cdot T_c} \quad (3.23)$$

Substituindo  $\tau = 0,269$  e  $K = 1,0$  na equação 7.3:

$$K_p = \frac{0,269}{1,0 \cdot 0,7 \cdot 0,269} = 1,428 \quad (3.24)$$

Equação para calcular  $T_i$ :

$$T_i = \min[\tau, K_1 \cdot T_c] \quad (3.25)$$

Substituindo na equação 7.5:

$$T_i = \min[0,269, 0,7532] \leftrightarrow T_i = 0,269 \quad (3.26)$$

Pelo fato do controlador ser um PI, será utilizado a equação equivalente da 3.18, sem o  $T_d$  que é zero:

$$PI(s) = K_p \left( \frac{s + \frac{1}{T_i}}{s} \right) \quad (3.27)$$

Substituindo  $T_i = 0,269$  e  $K_p = 1,428$ , a equação final do controlador PI:

$$PI_{br}(s) = 1,428 \left( \frac{s + 3,717}{s} \right) \quad (3.28)$$

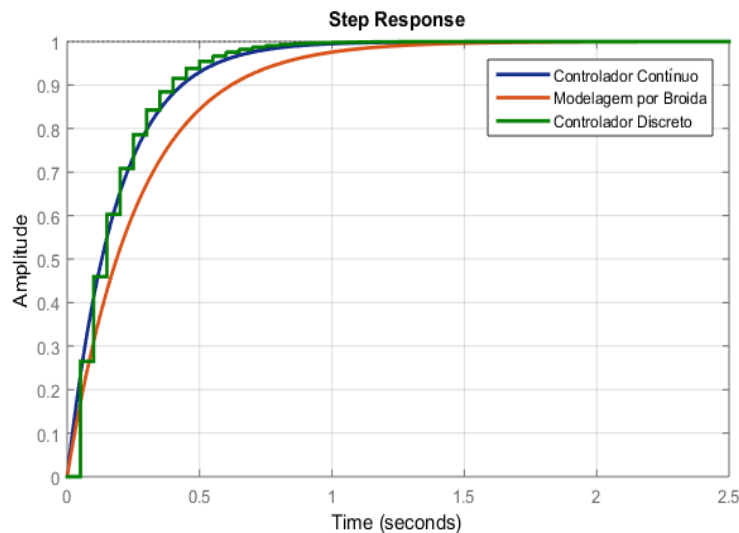
Como já foi fundamentado no capítulo 2, para implementar a função de transferência do controlador em uma plataforma eletrônica é necessário discretizar a função em S para uma função equivalente em Z, para discretizar o controlador foi utilizado a função c2d do Matlab, pelo método de Tustin, onde deve-se substituir na equação no domínio contínuo  $s = \frac{2(Z-1)}{T(Z+1)}$ ,  $T=0,05s$ . Equação do controlador de malha aberta discretizada por Tustin é a 3.29 e a de malha fechada é 3.30:

$$PI_{br}(Z) = \frac{1.561 z - 1.296}{(Z - 1)} \quad (3.29)$$

$$PI_{br}(Z) = \frac{0.2648 z - 0.2198}{z^2 - 1.566 z + 0.6106} \quad (3.30)$$

Na figura 33 é possível ver o gráfico gerado para a modelagem por Broida do sistema, o controlador em tempo contínuo e discreto.

**Figura 33 - Gráfico das funções pelo método de Broida**



Fonte: Autoria Própria

As equações 3.31, 3.32 e 3.33 representam os cálculos realizados para a modelagem por Broida. Substituindo  $T_i = 0,256$  e  $K_p = 1,428$ , a equação final do controlador PI:

$$PI_{sk}(s) = 1,428 \left( \frac{s + 3,906}{s} \right) \quad (3.31)$$

Para discretizar o controlador foi utilizado a função c2d do Matlab, pelo método de Tustin, onde deve-se substituir na equação no domínio contínuo  $s = \frac{2(Z-1)}{T(Z+1)}$ ,  $T=0,05s$ .

Equação do controlador de malha aberta discretizada por Tustin:

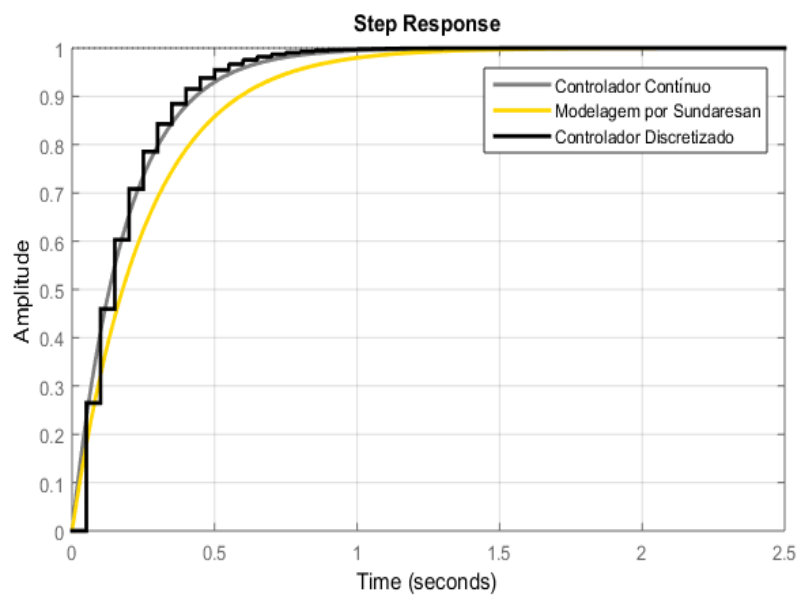
$$PI_{sk}(Z) = \frac{1.492 z - 1.227}{(Z - 1)} \quad (3.32)$$

Equação do controlador de malha fechada discretizada por Tustin:

$$PI_{br}(Z) = \frac{0.2648 z - 0.2177}{z^2 - 1.558 z + 0.6049} \quad (3.33)$$

Na figura 34 é possível ver o gráfico gerado para a modelagem por Sundaresan do sistema, o controlador em tempo contínuo e discreto.

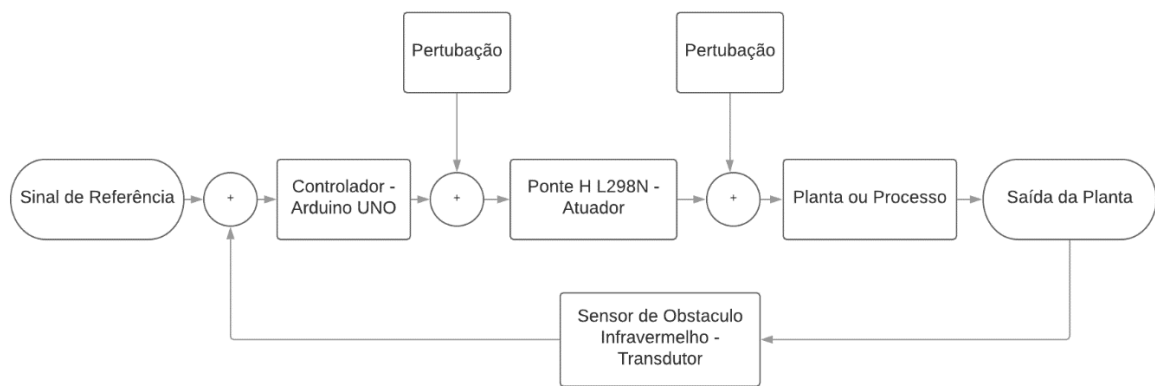
**Figura 34 - Gráfico das funções pelo método de Sundaresan**



Fonte: Autoria Própria

Após realizar a simulação dos controladores no Matlab, e ver que o tempo de assentamento do sistema dinâmico diminuiu e os valores foram para a referência desejada, foi iniciado o processo de implementação no Arduino UNO, onde será utilizada como plataforma eletrônica para realizar o controle e irá enviar o sinal PWM para a ponte H L298N que é o drive de potência do sistema que será utilizado como atuador para o controle da planta, que no projeto é a mini turbina, para transdutor foi utilizado o sensor de obstáculo infravermelho. Estas informações podem ser visualizadas na figura 35.

**Figura 35 - Malha de controle do sistema dinâmico**



Fonte: Autoria Própria

A implementação do controlador na programação do Arduino foi realizada por meio das equações de diferenças da função de transferência de cada método realizado, Broida e Sundaresan-Krishnaswamy. Pela equação 3.29 aplicando equações diferenças foi obtido a seguinte equação 3.34, resultando na equação pelo método de Broida implementado no Arduino.

$$c(k) = 1.561 * e(k) - 1.296 * e(k - 1) + c(k - 1) \quad (3.34)$$

Para o método de Sundaresan- Krishnaswamy foi realizado o mesmo procedimento, onde a equação 3.32 foi aplicado equações diferenciais resultando na equação 3.35.

$$c(k) = 1.492 * e(k) - 1.227 * e(k - 1) + c(k - 1) \quad (3.35)$$

Foi realizado um algoritmo que integrasse as programações do supervisor, leitura do sensor, acionamento dos LEDs para indicação da velocidade e controlador PI. Onde foi possível ver o sinal do PWM reagindo a cada valor de referência diferente escolhido no supervisor

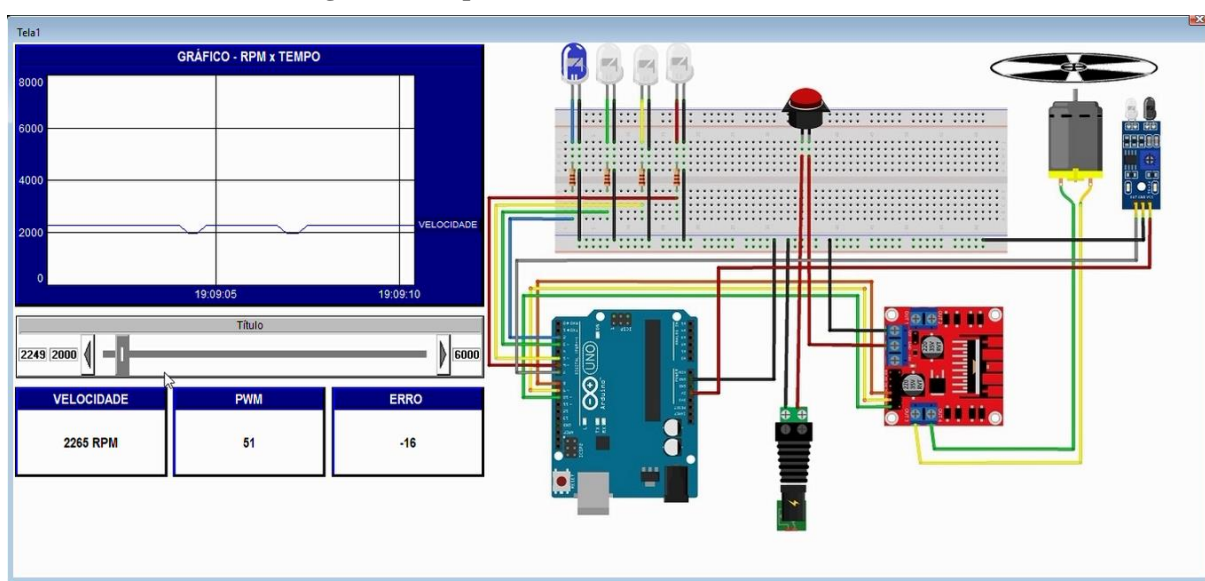
SCADA/Mobile e controlando quando uma perturbação interagia com o sistema, sendo no caso do projeto um vento aplicado a região frontal da mini turbina.

Cada LED no sistema tem uma faixa de RPM, sendo o primeiro o azul, de 2000 RPM acima ele acende, o segundo sendo o verde, de 3000 RPM acima ele acende, o terceiro sendo o amarelo, de 4000 RPM acima ele acende e por fim o quarto sendo o vermelho que acende de 6000 RPM acima, os LEDs no sistema funciona como HMI e no supervisório como indicador visual. Com isso foi finalizado o projeto dos controladores e foi feito uma comparação dos mesmo para identificar qual obter a melhor resposta.

## 4 – RESULTADOS

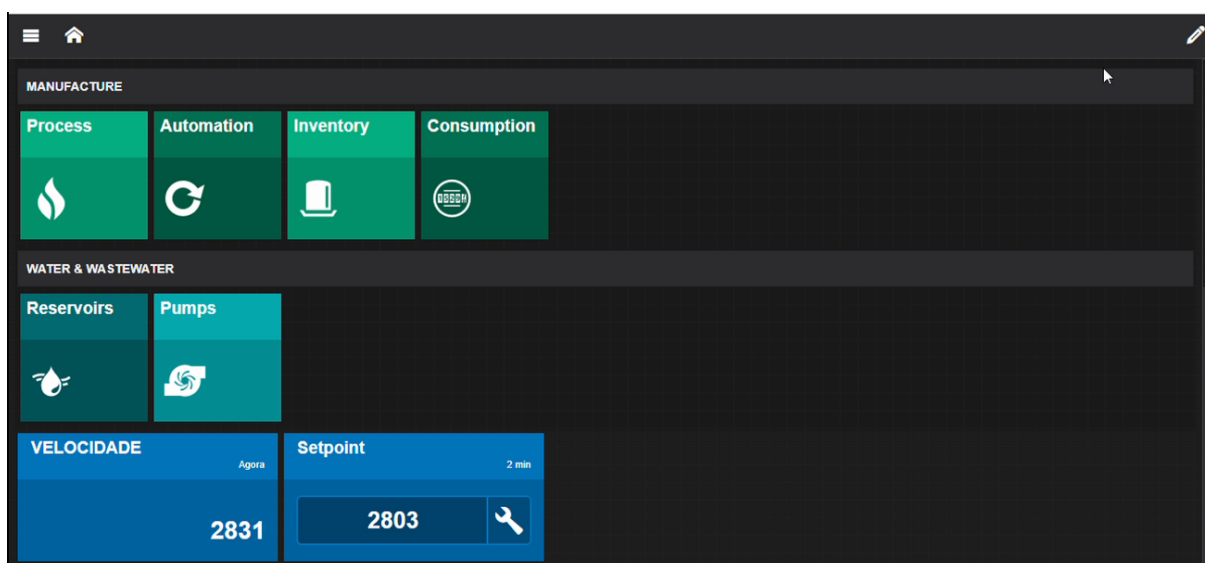
Com os controladores implementados e em pleno funcionamento, foi realizado uma comparação das simulações com a prática e observado qual controlador PI pela modelagem por Broida ou PI pela modelagem por Sundaresan-Krishnaswamy apresentava o melhor desempenho. As figuras 36 e 37 mostram as aplicações dos supervisórios com os controladores PI para ambos os métodos.

**Figura 36 - Supervisório SCADA com o controlador PI**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 37 - Supervisório Mobile com o controlador PI**

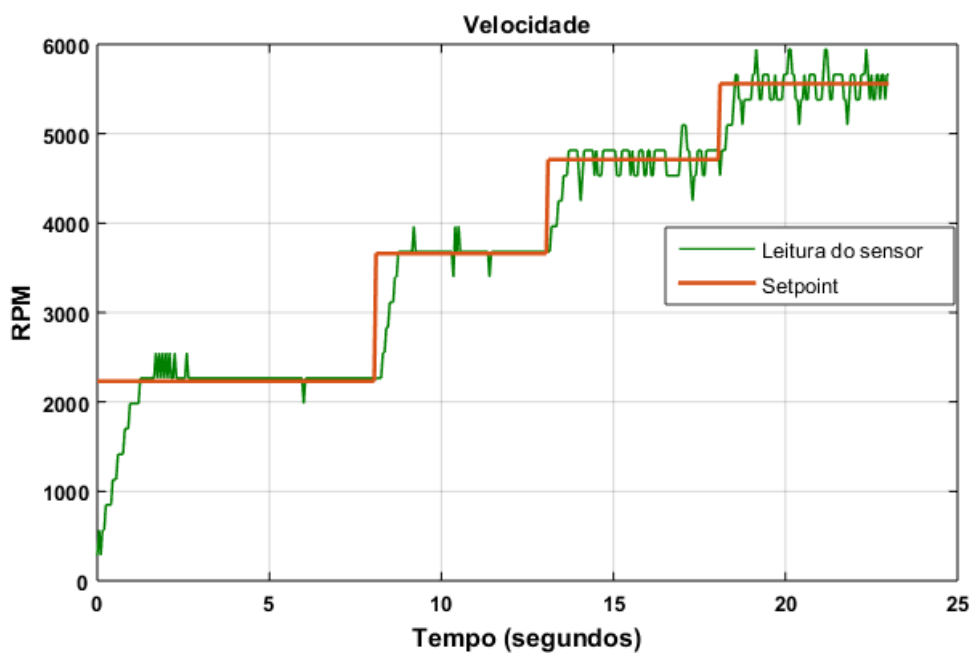


Fonte: Autoria Própria



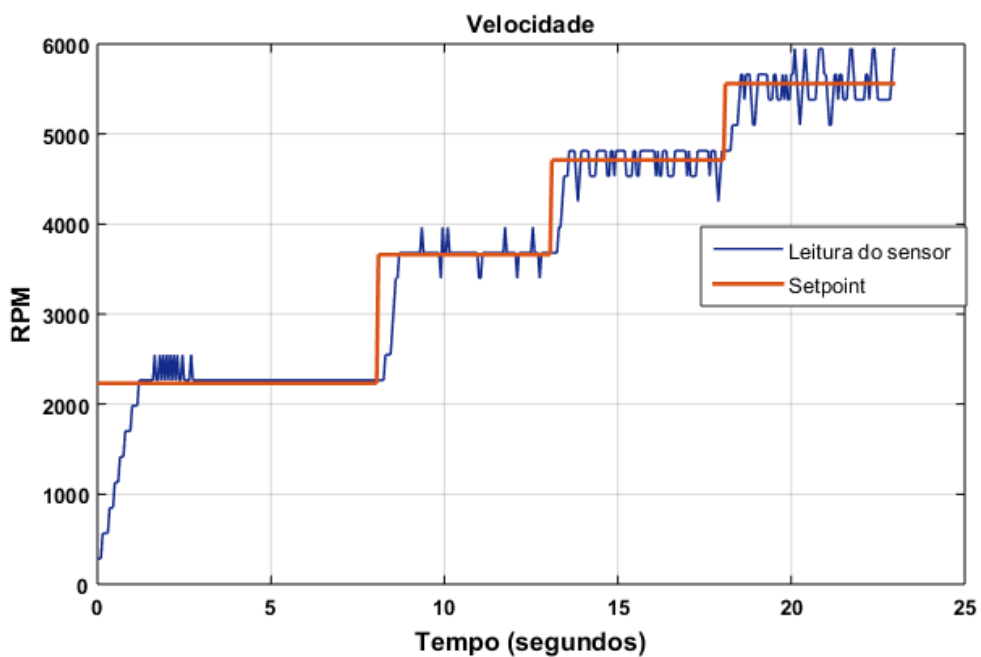
Com a aplicação de valores diferentes de sinal de referência foi gerado um gráfico no Matlab onde possa visualizar a resposta na prática de cada controlador PI. Nas figuras 38 e 39 é apresentado as informações obtidas.

**Figura 38 - Resposta do controlador PI para a modelagem de Broida**



Fonte: Autoria Própria

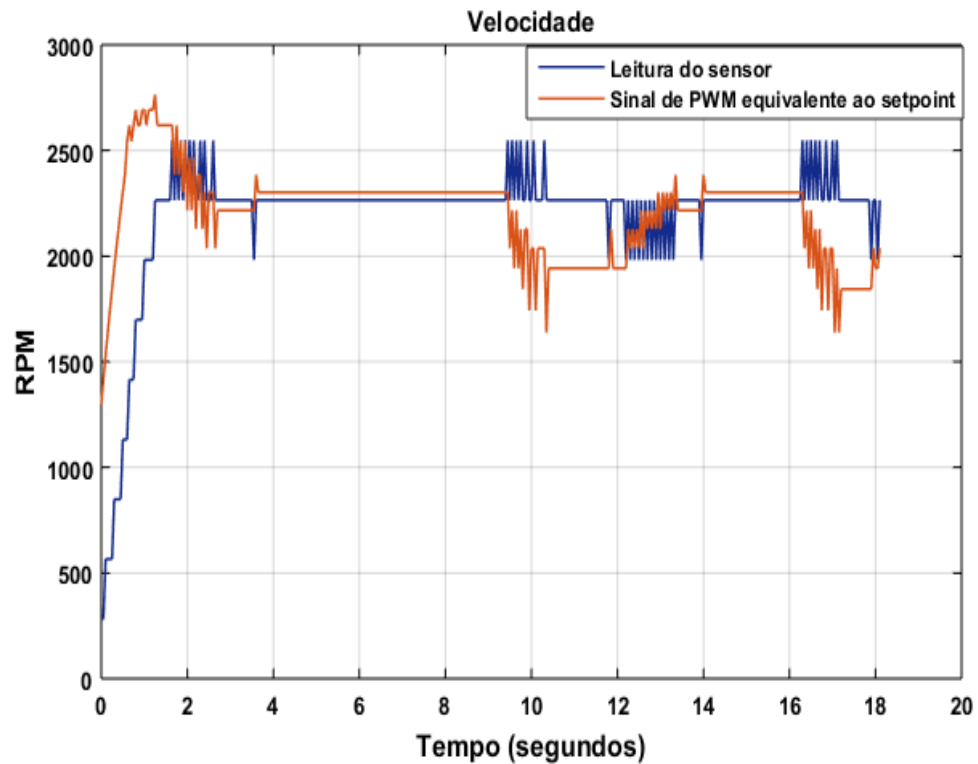
**Figura 39 - Resposta do controlador PI para a modelagem por Sundaesan-Krishnaswamy**



Fonte: Autoria Própria

Com a aplicação de um vento na região frontal da turbina foi possível perceber a variação na velocidade, aumentando a rotação do motor, em seguida o sinal de PWM foi alterado para equilibrar o sistema ao sinal de referência, realizando assim o controle do sistema, com os dados coletados foi gerado um gráfico no Matlab para visualizar as informações. Na figura 40 é possível notar as alterações.

**Figura 40 - Aplicação de uma perturbação ao sistema**



Fonte: Autoria Própria

## 5 – CONCLUSÃO

Ao final dos experimentos simulados e práticos foi possível notar que o controlador PI, para ambos os métodos de modelagem realizados no sistema, respondeu satisfatoriamente ao projetado, para um sistema de controle de rotação, tendo algumas oscilações em baixas rotações e alterações mais evidentes em alta rotação, sendo essa uma das características intrínsecas do próprio sistema. Com a aplicação de uma perturbação o sistema de controle respondeu rapidamente, que é uma característica de um sistema elétrico, onde a leitura do sensor é realizada em 0.05 segundos. No sistema dinâmico proposto foi implementado um supervisório SCADA/Mobile que atendeu todas as necessidades do projeto, mesmo estando limitado à um número de informações que poderia ser coletada ou enviada, principalmente no supervisório Mobile, com o uso da rede TCP/IP em sistemas de controle é possível ir muito além, aplicando supervisórios e controladores remotamente.

Para sugestões futuras a continuidade desse projeto, é recomendando utilizar motores sem escovas, pelo fato de possuir uma alta rotação se comparado aos motores com escovas e um torque mais elevado, além de serem bastante utilizados em aeromodelos de drones, além do motor também seria interessante a aplicação de uma plataforma eletrônica com uma maior taxa de processamento dos dados e mais I/O para ter possibilidades de crescimento da necessidade de pinos com saída PWM, sendo fundamental a própria placa ter conexão direta com a internet, não sendo necessário a utilização de um dispositivo extra, como as placas esp8266 e esp32, sendo que essas placas não tem drive de comunicação com os softwares Eclipse, sendo importante utilizar outros supervisórios ou outro protocolo de comunicação, como MQTT, outro ponto importante seria a utilização de um sensor mais robusto, onde a precisão e resolução sejam mais elevadas já que em velocidades acima de 6000 RPM o sensor óptico utilizado encontra bastante dificuldades de obter os dados corretos, sendo uma sugestão o sensor indutivo ou o sensor de efeito hall, onde existem aplicações industriais com os mesmo para medições de rotação de motores, a aplicação de outras metodologias de controle poderiam ser aplicadas ao sistema, como controle inteligente, adaptativo, preditivo entre outras metodologias de controle moderno para ser estudadas.

Tendo o projeto apresentado superado as dificuldades encontradas é possível concluir que, um sistema de controle PI com um supervisório pode ter excelentes resultados com os ajustes adequados para cada sistema dinâmico.

## 6 - REFERÊNCIAS

A. SCALASSARA P. R., V. A. N. A. B. **Projeto de sistemas de controle**. Curitiba: UTFPR, 2007. Acesso em 1 mar de 2019.

AERO MAGAZINE, **Onde está a turbina?** Disponível em:  
<[https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/onde-esta-turbina\\_3402.html](https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/onde-esta-turbina_3402.html)>. Acesso em: 01 mar. 2019.

ARDUINO E CIA, **Como medir a velocidade de um motor com o sensor lm393**. Disponível em:< <https://www.arduinoecia.com.br/2016/02/sensor-de-velocidade-lm393-arduino.html>>. Acesso em: 01 mar. 2019.

CASTRUCCI, Plínio de Lauro; BITTAR, Anselmo; SALES, Roberto Moura. **Controle Automático**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 476 p.

ANDRADE, L. R. S. **Estudo sobre controladores de corrente implementados digitalmente**. UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

ARDUINO EASY, **Sensor infravermelho de obstáculo com lm393** . Disponível em :  
<<https://arduinoeasy.wordpress.com/aplicacoes/sensor-infravermelho-de-obstaculo-com-lm393/>>. Acesso em: 13 fev 2019.

CITISYSTEMS, **O que é PWM e para que serve?.** Disponível em:  
<<https://www.citisystems.com.br/pwm/>>. Acesso em: 20 jan 2019.

COELHO, A. A. R.; COELHO, L. dos S. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. [S.l.: s.n.], 2004.

CRISCUOLI, F. P; MIRANDA, B. L. **Controle PID de motor DC de baixa potência implementado em um microcontrolador PIC**, UFES, Vitória, 2009.

EMBARCADOS, **Arduino UNO**. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-uno/>>. Acesso em: 25 fev 2019.

ELIPSE SOFTWARE, **Elipse plant manager**. Disponível em:

<<https://www.elipse.com.br/produto/elipse-plant-manager/>>. Acesso em: 25 fev 2019.

FADALI, M. Sami; VISIOLI, Antonio. **Digital Control Engineering: Analysis and Design**.

2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2013. 601 p.

FERNANDO K, **Turbina elétrica com ESP32**. Disponível em:

<<https://www.fernandok.com/2019/03/turbina-eletrica-com-esp32>>. Acesso em: 8 mar 2019.

FIRMINO, F. **Estudo comparativo de métodos de sintonia de controladores PID**. EESC –

USP. São Carlos, 2014. Acesso em 25 jan de 2019.

GRIGOLETTO, F. B; GABE, I. J; MASSING, J. R. **Projeto e implementação de um controlador de corrente robusto para inversores com filtro lcl conectados á rede com incertezas paramétricas**. UFSM, Santa Maria, 2009.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência**. Madrid: Pearson Educación, 2001. 472 p.

MÁQUINAS ELÉTRICAS I, **Aula 21 - Energização de Motor Corrente Contínua**

**Composto**. Disponível em: < <http://maquinaseletricas1.blogspot.com/2017/09/>>. Acesso em 28 fev de 2019.

MECAWEB, PWM - **Modulação Por Largura de Pulso**. Disponível em:

<[http://www.mecaweb.com.br/eletronica/content/e\\_pwm](http://www.mecaweb.com.br/eletronica/content/e_pwm)>. Acesso em: 28 jan 2019.

MIRANDA, R. D. **Modelamento de malha de controle de corrente em conversores de potência modulados por largura de pulso**. USP, São Paulo, 2012.

MUNDO PROJETADO, **Sensor de obstáculo infravermelho**. Disponível em:

<<http://mundoprojetado.com.br/sensor-de-obstaculo-infravermelho/>>. Acesso em: 20 jan 2019.

NASCIMENTO, Á. R. C; SILVA, I. F; SILVA, J. D. R. **Modelagem e controle PI aplicado a luminosidade do processo com uso da placa de aquisição 6008**. IFPB, João Pessoa, 2017.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 1285 p.

OGATA, K. **Discrete-time control systems**. [S.l.]: Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1995.

PATANÉ, E. J. **Implementação de controle de velocidade em malha fechada para motores de corrente contínua utilizando sistema de aquisição de dados**. Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2008.

PINTO, J.E. M. G. **Aplicação prática de método de sintonia de controladores PID utilizando o método de rele com histerese**. UFRN, Natal, 2014. Acesso em 25 jan de 2019.

PORTAL VIDA DE SILICIO, **Driver motor com Ponte H L298N – controlando motor DC com arduino** . Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/driver-motor-com-ponte-h-l298n/>>. Acesso em 20 fev 2019.

SALES, F; SILVA, V. SIMÕES, Y. **Controle digital de velocidade angular de dois motores de uma plataforma robótica**. IFPB. João Pessoa, 2018.

SEU CONDOMÍNIO. **Otimizando a gestão condominial com iot (Internet of Things)**. Disponível em: <<https://www.seucondominio.com.br/noticias/otimizando-a-gestao-condominial-com-a-iot-internet-of-things>>. Acesso em: 01 fev 2019.

SILVA, F. C. **Planta didática – controle PID digital para motor DC**. Universidade Positivo/NCET, Curitiba, 2008.

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. **Motor CC: Saiba como funciona e de que forma especificar**. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>>. Acesso em: 01 fev 2019.

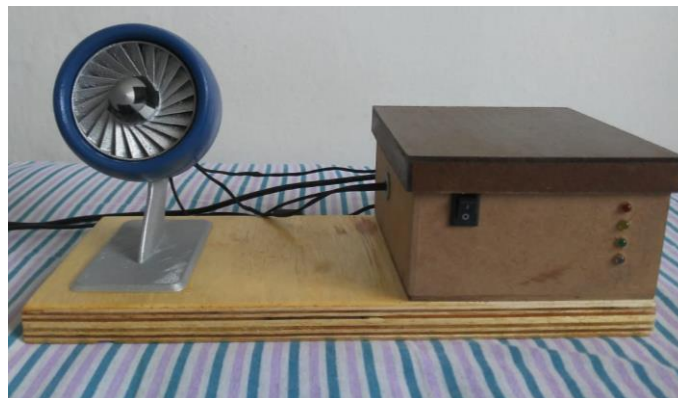
## 7 – APÊNDICE

### APÊNDICE 1



Fonte: Autoria Própria

### APÊNDICE 2



Fonte: Autoria Própria

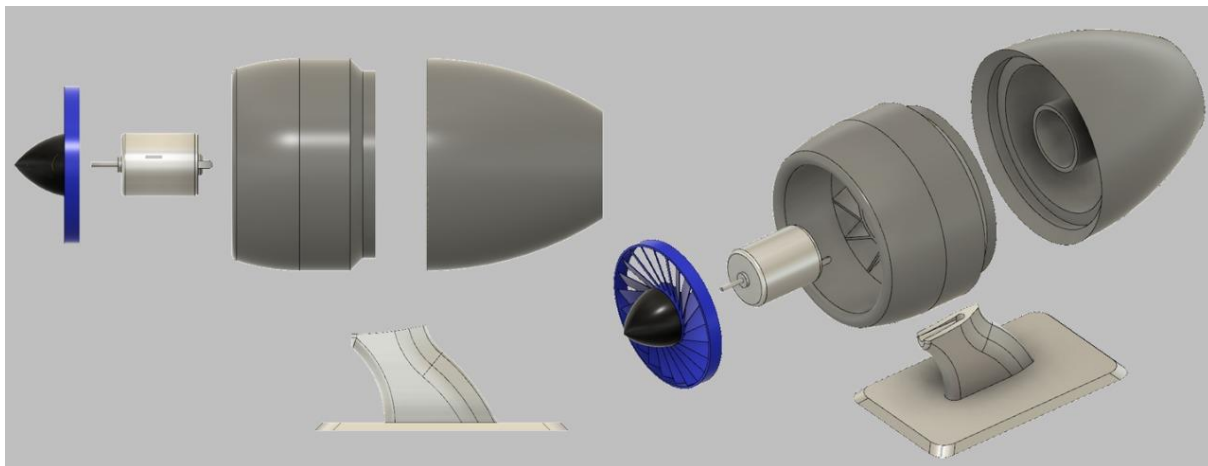
### APÊNDICE 3



Fonte: Autoria Própria

## 8 - ANEXO

### ANEXO 1



Fonte:< <https://www.fernandok.com/2019/03/turbina-eletrica-com-esp32.html> >. Acesso em: 8 mar 2019.