

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO  
CÂMPUS BIRIGUI

LEANDRO CAMPOS VARGAS

PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO E ENSINO EM  
CONTROLE

BIRIGUI

2021



LEANDRO CAMPOS VARGAS

## Plataforma de Simulação e Ensino em Controle

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia de  
São Paulo, como requisito parcial para  
conclusão do curso de Engenharia da  
Computação.

Área de Concentração: Internet  
das coisas e Controle de Processos

Orientador: Prof. Dr. Graciliano Antonio  
Damazo

BIRIGUI

2021

Folha destinada à inclusão da Catalogação na Fonte - Ficha Catalográfica (a ser solicitada à Biblioteca IFSP – Câmpus São João da Boa Vista e posteriormente impressa no verso da Folha de Rosto (folha anterior).

Catalogação na Fonte preparada pela Biblioteca Comunitária “Wolgran Junqueira Ferreira”  
do IFSP – Câmpus São João da Boa Vista

Dados da ficha

# RESUMO

Elemento obrigatório, constituído de uma sequência de frases concisas e objetivas, fornecendo uma visão rápida e clara do conteúdo do estudo. O texto deverá conter entre 150 a 250 palavras e ser antecedido pela referência do estudo. Também, não deve conter citações e deverá ressaltar o objetivo, o método, os resultados e as conclusões. O resumo deve ser redigido em parágrafo único, seguido das palavras representativas do conteúdo do estudo, isto é, palavras-chave, em número de três a cinco, separadas entre si por ponto e finalizadas também por ponto. Usar o verbo na terceira pessoa do singular, com linguagem impessoal (pronome SE), bem como fazer uso, preferencialmente, da voz ativa.

**Palavras-chave:** Palavra-chave 1. Palavra-chave 2. Palavra-chave 3. Palavra-chave n.



# ABSTRACT OU RÉSUMÉ OU RESUMEN

Elemento obrigatório. É a versão do resumo em português para o idioma de divulgação internacional. Deve ser antecedido pela referência do estudo.

**Keywords:** Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3. Keyword n.

Elemento obrigatório. É a versão do resumo em português para o idioma de divulgação internacional. Deve ser antecedido pela referência do estudo.

**Mots-clés :** Mot 1. Mot 2. Mot 3. Mot n.

Elemento obrigatório. É a versão do resumo em português para o idioma de divulgação internacional. Deve ser antecedido pela referência do estudo.

**Palabras clave:** Palabra 1. Palabra 2. Palabra 3. Palabra n.





# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de controle de James Watt . . . . .	17
Figura 2 – Curva de resposta em forma de S, e suas constantes . . . . .	19
Figura 3 – Regras Fuzzy para temperatura. . . . .	22
Figura 4 – Mercado para o ecossistema da IoT. . . . .	24
Figura 5 – A "Coisa". . . . .	25
Figura 6 – Comunicação através do gateway. . . . .	25
Figura 7 – Estrutura de comunicação do MQTT. . . . .	26
Figura 8 – Modelo pêndulo invertido . . . . .	28
Figura 9 – Modelo 3D do pêndulo invertido. . . . .	30



# LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo do comportamento do sistema para cada ganho . . . . .	19
Quadro 2 – Equações de sintonia metodo 1 . . . . .	20
Quadro 3 – Equações de sintonia metodo 2 . . . . .	20
Quadro 4 – Protocolos da camada física de acordo com a distância e volume de dados. . . . .	26



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>15</b>
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
<b>1.3</b>	<b>Organização Deste Trabalho</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Noções de Controle</b>	<b>17</b>
2.1.1	Controle Clássico	18
2.1.2	Controle Moderno	20
2.1.2.1	Controle Ótimo	21
2.1.2.2	Controle Robusto	21
2.1.2.3	Controle Fuzzy Takagi-Sugeno	22
<b>2.2</b>	<b>Internet of Things</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia da Planta, do Hardware e Firmware</b>	<b>27</b>
3.1.1	Materiais	27
3.1.2	Metodologia	27
<b>3.2</b>	<b>Metodologia dos aplicativos de dispositivo móvel e web.</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Desenvolvimento da Planta, Hardware e Firmware</b>	<b>29</b>
4.1.1	Modelagem Física	29
4.1.2	Desenvolvimento da Planta	29
<b>5</b>	<b>CRONOGRAMA</b>	<b>31</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>33</b>



# 1 INTRODUÇÃO

O sistemas de controle são sistemas capazes de direcionar a um objetivo a planta controlada, esses sistemas podem ser projetados com diversas estratégias vistas na teoria de controle clássico, controle moderno, teorias de controle robusto, controle ótimo, controle digital, controle fuzzy takagi-sugeno, entre outros (OGATA,2016). Em que podem ser aplicados em diversas áreas da industrias como posicionamento de motores para máquinas CNC, controle de processos na industria alimenticia, robótica, e outras áreas como astronomia, com posicionamento de telescópios automáticos, aeroespacial com controles de posicionamento satelites, são alguns dos exemplos de aplicações (OGATA, 2010).

## 1.1 Justificativa

O estudo de sistemas de controle é uma das principais disciplinas em um curso da área de engenharia de controle e automação ou mecatrônica. Entretanto por envolverem cálculos complexos e modelos físicos, os alunos tem a dificuldade absorver a informação e desenvolver projetos nessa área do conhecimento. E Segundo Silva (2017) aulas experimentais e aulas práticas tem os benefícios de permitir o aluno assimilar aos conteudos teóricos apresentados em sala de aula e despertar o interesse do aluno pela a área. Assim, justifica-se o trabalho desenvolvido.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O projeto tem como objetivo desenvolver um sistema para realizar ensaios com diferentes estratégias de controlador, em que o aluno possa estudar de forma prática e remota com um auxílio de um aplicativo para dispositivo móvel e web.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Construir uma planta;
- Desenvolver controlador com internet das coisas;
- Desenvolver Aplicativo para dispositivo móvel;
- Desenvolver Aplicativo para dispositivo web.

## 1.3 Organização Deste Trabalho

A dissertação está organizada em seis capítulos, em o capítulo 2 trata-se da revisão bibliográfica separadas em duas seções em que a Seção 2.1 revisão algumas das estratégias de controle que poderam ser utilizadas no trabalho e Seção 2.2 descreve as bibliografias utilizadas para o sistema com internet das coisas (IoT). No capítulo 3 estão descritos os materiais e a metodologia utilizados para desenvolver o sistema dividida em duas seções, planta e aplicativos. E no capítulo 4 possui o desenvolvimento com os requisitos do sistema, modelagem do sistema, fluxograma, modelagem da planta, desenhos do sistema e da planta controlada. Capítulo 5 demonstra alguns resultados dos controladores utilizados no sistema desenvolvido. E finalmente conclui-se o trabalho no capítulo 6.



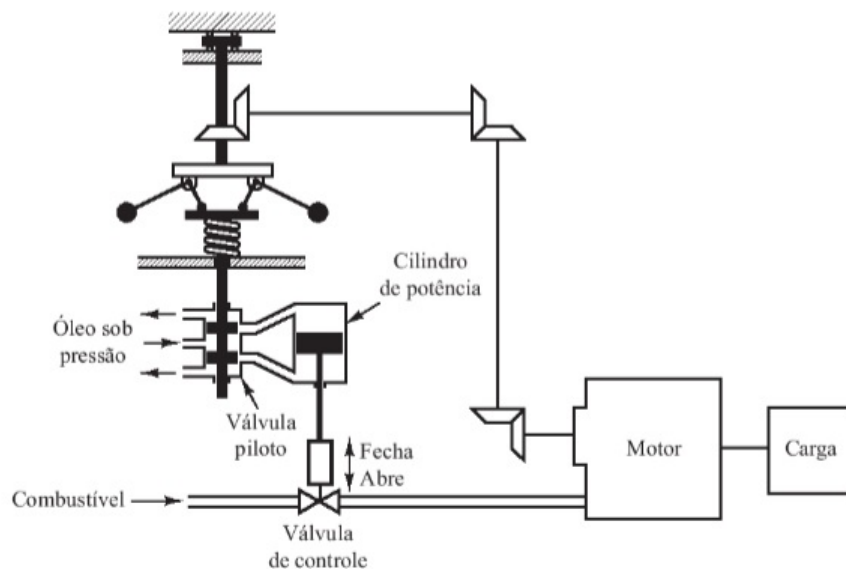
## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão bibliográfica é separada em duas seções em que a Seção 2.1 revisão algumas das estratégias de controle que poderam ser utilizadas no trabalho e Seção 2.2 descreve as bibliografias utilizadas para o sistema com internet das coisas (IoT).

### 2.1 Noções de Controle

Um dos primeiros trabalhos de controle automático foi o regulador centrífugo construído por James Watt, no século XVIII, para controlar a velocidade de uma máquina a vapor, sistema ilustrado na figura 1, em que a velocidade do motor era usada como informação para controlar a quantidade de combustível que iria ao motor (OGATA, 2010).

Figura 1 – Sistema de controle de James Watt



**Fonte:** (OGATA, 2010)

Em 1922, Minorsky trabalhou em controladores automáticos e demonstrou como a estabilidade poderia ser determinada a partir de equações diferenciais (OGATA, 2010). Na década 1930 desenvolvido por Nyquist procedimentos para determinar a estabilidade de sistemas de malha fechada (OGATA, 2010). E do ano de 1940 a 1950 foi desenvolvida o chamado controle clássico utilizando métodos de resposta em frequência e lugares das raízes, nessa época engenheiros desenvolver controladores PID no controle de pressão, temperatura entre outros (OGATA, 2010). Os métodos encontrados na teoria clássica de controle conduzem a sistemas que são estáveis e satisfazem um conjunto de condições de desempenho, entretanto essas estratégias não são ótimas para algum aspecto em muitos

sistemas (OGATA, 2010). O controle clássico pode ser ineficiente quando tratamos sistemas complexos, com muitas entradas e saídas, pois a teoria clássica lida apenas com uma entrada e saída (OGATA, 2010). Portanto a partir de 1960 foram introduzidos a teoria de controle moderno através do emprego de variáveis de estado (OGATA, 2010). Em foram capazes de lidar com a crescente complexidade dos sistemas e seus requisitos relativos à precisão e ao custo (OGATA, 2010). Entre 1960 e 1980 foram desenvolvidos o controle ótimo em sistemas determinísticos e estocásticos, que levam em consideração o custo do desempenhado no controle, também foram desenvolvidos o controle adaptativo e de aprendizagem de sistemas complexos (OGATA, 2010). Em 1980 a 1990 foi desenvolvido o controle robusto que é capaz de se manter estável mesmo após alterações de algum aspecto das plantas (OGATA, 2010). Atualmente existem trabalho utilizando a teoria de controle moderno com a teoria de lógica fuzzy, chamados controle Fuzzy Takagi-Sugeno, e controladores chaveados e controle de feedback de saída estática (OGATA, 2010; SERENI, 2019). O trabalho irá descrever os métodos de desenvolvimento de alguns dos controladores descritos.

### 2.1.1 Controle Clássico

Mais da metade dos controladores industriais em 2010 emprega esquemas de controlador PID ou PID modificado (OGATA, 2010). E a maioria dos controladores são ajustados em campo, com diferentes estratégias de sintonia, em alguns casos os métodos são automáticos (OGATA, 2010). A expansão da aplicação do PID é devido a factibilidade na maioria das plantas, em particular, quando o modelo matemático do sistema não é conhecido, controlador PID com auto sintonia é recurso muito aplicado (OGATA, 2010). Controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) pois o controlador computa a derivada do erro, a integral do erro e o erro para determinar a próxima entrada do sistema, que funciona seguindo a equação de trabalho 2.1 em  $u(t)$  é a saída do controlador e  $e(t)$  é a variável que representa o erro, que é a diferença entre a saída desejada e saída atual (MESSNER et al., 2019).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Para simplificação na sintonia, a transformada de Laplace pode ser utilizada em 2.1 como vemos em 2.2, onde  $K_p$  é o ganho proporcional,  $K_i$  ganho integral e  $K_d$  = ganho derivativo.

$$U(S) = (K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S) E(S) = \frac{(K_d S^2 + K_p S + K_i) E(S)}{S} \quad (2.2)$$

O ganho proporcional  $K_p$  tem efeito proporcional ao do sinal de controle para o mesmo nível de erro, fazendo que o controlador responda mais rápido, mas também tenha overshoot, e  $K_p$  também tende a reduzir, mas não eliminar o erro estacionário (MESSNER et al., 2019). O ganho derivativo  $K_d$  dá ao controlador habilidade de antecipar o erro, o sinal de controle pode se tornar grande se o erro começar a subir, mesmo quando a magnitude do erro ainda

for relativamente pequena. Essa antecipação tende a adicionar amortecimento ao sistema, diminuindo assim o overshoot, entretanto, não tem efeito no erro de estado estacionário (MESSNER et al., 2019). O ganho integral ( $K_i$ ) tende a reduzir o erro estacionário, entretanto pode fazer um sistema oscilatório. O comportamento geral do sistema para cada ganho em circuito fechado está resumido no Quadro 1 (MESSNER et al., 2019).

Quadro 1 – Resumo do comportamento do sistema para cada ganho

	<i>Tempo de subida</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Tempo de Assentamento</i>	<i>Erro Estacionário</i>
$K_p$	Diminui	Aumenta	Pequena mudança	Diminui
$K_i$	Diminui	Aumenta	Aumenta	Diminui
$K_d$	Pequena mudança	Diminui	Diminui	Não muda

**Fonte:** (MESSNER et al., 2019).

Existem dois métodos de sintonias desenvolvidas por Ziegler-Nichols que descrevemos no trabalho (OGATA, 2010).

No primeiro método, obtemos a resposta da planta de uma entrada de degrau unitário, através de cálculo, experimentação ou simulação (OGATA, 2010). Na curva obtida pode-se observar duas constantes, o atraso  $L$  e a constante de tempo  $T$ , que são obtidas traçando a reta tangente no ponto de inflexão da curva, como demonstrada na figura 2. Esse método só pode ser aplicado em plantas que não possuem integradores ou polos complexos conjugados (OGATA, 2010).

Figura 2 – Curva de resposta em forma de S, e suas constantes



**Fonte:** (OGATA, 2010).

Ziegler e Nichols sugeriram escolher valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  de acordo com as fórmulas demonstradas no quadro 2.

Quadro 2 – Equações de sintonia metodo 1

<i>Tipo de controlador</i>	$K_p$	$K_i$	$K_d$
<i>P</i>	$\frac{T}{L}$	0	0
<i>PI</i>	$\frac{0,9T}{L}$	$\frac{0,3}{L}$	0
<i>PID</i>	$\frac{1,2T}{L}$	$\frac{1}{2L}$	$\frac{2}{L}$

**Fonte:** (OGATA, 2010).

Segundo Método, obtemos a função de transferência de malha fechada para um controlador genérico  $K$ , e obtemos o valor de  $K$  crítico que torna o sistema marginalmente estável, usando o critério de Routh (OGATA, 2010). Com o ganho crítico  $k_{cr}$  é possível determinar a frequência de oscilação  $\omega$  sustentada na função de transferência de malha fechada (OGATA, 2010). E com essas constantes é possível determinar os valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  usando o quadro 3 com valores sugeridos por Ziegler e Nichols (OGATA, 2010).

Quadro 3 – Equações de sintonia metodo 2

<i>Tipo de controlador</i>	$K_p$	$K_i$	$K_d$
<i>P</i>	$0,5K_{cr}$	0	0
<i>PI</i>	$0,45K_{cr}$	$1,2\omega$	0
<i>PID</i>	$0,6K_{cr}$	$0,5\omega$	$0,125\omega$

**Fonte:** (OGATA, 2010).

### 2.1.2 Controle Moderno

Enquanto na teoria de controle clássico baseia-se na relação entrada e saída, a teoria de controle moderno relaciona-se na descrição de um sistema de equações diferenciais de primeira ordem de  $n$  termos, em que podem ser utilizadas em uma notação vetorial-matricial de primeira ordem as chamadas matrizes de estados (OGATA, 2010). A equação

2.3 demonstra um exemplo de matriz de estado.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & -a_n \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -a_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -a_1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_n - a_n b_0 \\ b_{n-1} - a_{n-1} b_0 \\ \vdots \\ b_1 - a_1 b_0 \end{bmatrix} u \\ y &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + Du \end{aligned} \quad (2.3)$$

O sistema de controle para a teoria moderna é definido por 2.4.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2.4)$$

E que determinado os valores da matriz K do controlador através de desigualdades matriciais lineares, que devemos considerar os requisitos do sistema e seguir o teorema de Lyapunov, que determina um sistema é assintoticamente estável se que partindo de uma condição inicial a planta sempre converge para um ponto de equilíbrio, ou que o maior ou todos auto valores do sistema tem parte real negativa (ASSUNÇÃO, 2018b).

Equação de Lyapunov 2.5

$$\begin{aligned} &\text{Exista uma matriz } P \text{ que :} \\ &P > 0 \\ &A^T P + P A < 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

No caso do controlador a equação 2.5 fica como 2.6 (ASSUNÇÃO, 2018b).

$$\begin{aligned} &\text{Exista uma matriz } P \text{ que :} \\ &X = P^{-1} \\ &X > 0 \\ &X A^T + A X - Z^T B^T - B Z < 0 \\ &\text{em que } K = Z P. \end{aligned} \quad (2.6)$$

### 2.1.2.1 Controle Ótimo

### 2.1.2.2 Controle Robusto

Considerando que existem sistemas que possuem parâmetros incertos, como variação de massa de foguete, medida de um barômetro de um avião de caça, constante de amortecimento de uma suspensão de um veículo, o controle robusto deve ser capaz de lidar com essas alterações (ASSUNÇÃO, 2018a).

Um dos tipos de incertezas encontrados são as incertezas politópicas, que podem ser descritas através da combinação convexa de  $N$  matrizes do sistema (ASSUNÇÃO, 2018a). Em que os limites de variação dos parâmetros definem um politopo. Em que o número de vértices nesse politopo é determinado a partir do número de incertezas equação 2.7, onde  $r$  é o número de incertezas (ASSUNÇÃO, 2018a).

$$N = 2^r \quad (2.7)$$

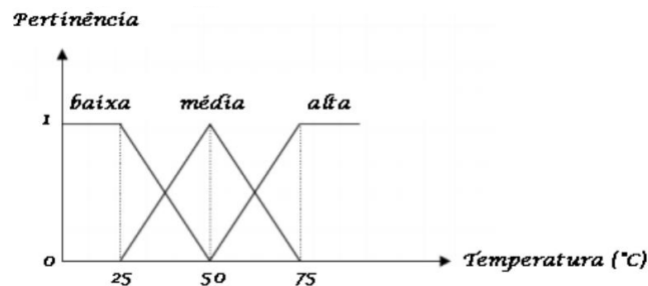
E controlador  $K$  é determinado através de desigualdades matriciais lineares que devem considerar os requisitos do sistema em todos os vértices do politopo e seguir o teorema de Lyapunov (ASSUNÇÃO, 2018a). Fazendo assim o controlador capaz de levar a um ponto de equilíbrio em todas as condições iniciais com diferentes parâmetros (ASSUNÇÃO, 2018a). E para o caso da teoria de controlador robusto é definida como a equação 2.8.

$$\begin{aligned} & \text{Exista uma matriz } P \text{ que :} \\ & X = P^{-1} \\ & X > 0 \\ & X A_i^T + A_i X - Z^T B_i^T - B_i Z < 0 \\ & \text{em que } K = ZP. \\ & \text{Para todo } i = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (2.8)$$

### 2.1.2.3 Controle Fuzzy Takagi-Sugeno

O controle fuzzy takashi-sugeno é método de projeto de controladores modernos, utilizando espaço de estados e desigualdades matriciais lineares, que utilizando conceitos da lógica Fuzzy para lidar com não-linearidades nos sistemas controlados (CARDIM, 2020a). A lógica fuzzy ou lógica nebulosa consiste em regras que não são simplesmente verdadeiros ou falsos, ela trata valores entre 0 e 1, assim pode existir uma meia verdade no valor pertinência 0,5 (CARDIM, 2020a). A lógica fuzzy se baseia em regra para definir o valor de pertinência como mostra a figura 3 que demonstra a definição de temperatura baixa, média ou alta.

Figura 3 – Regras Fuzzy para temperatura.



Fonte: (CARDIM, 2020a).

Como podemos observar há etapas transições nessas regras em que podemos ter uma temperatura em que ela está meio média e meio baixa, ou meio média e meia alta (CARDIM, 2020a). Essas funções de pertinência podem ser ajustadas conforme desejado (CARDIM, 2020a).

Um dos benefícios de utilizar essa teoria na área de sistemas de controle é a capacidade de se adaptar em possíveis situações não-lineares, parâmetros variantes no tempo ou perturbações, que devido as regras que definem a pertinências o controle se torna flexível às mudanças (CARDIM, 2020a).

Considerando a teoria de lógica nebulosa o modelo do controlador pode ser definido por 2.9 (SOUZA et al., 2014).

$$\begin{aligned} \text{Rule } i : & \text{ IF } z_1(t) \text{ is } M_1^i, \dots, z_p \text{ is } M_p^i, \\ \text{then } & \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \\ y(t) = C_i x(t), \end{cases} \\ \text{Onde } & M_j^i \text{ oconjunto } j \text{ de regras } i, i \in K_r \text{ e } j \in K_p. \end{aligned} \quad (2.9)$$

E que podemos escrever também 2.10 (SOUZA et al., 2014).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r \alpha_i(x(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)), \\ \text{Onde } \alpha & \text{ o valor das} \\ \text{regras fuzzy do sistema modelado.} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Definindo um controle na equação 2.9 e 2.10 podemos descrever a equação 2.11 (SOUZA et al., 2014).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \alpha_i(x(t)) \alpha_j(x(t)) [A_i - B_i K_j] x(t) \\ &= [A(\alpha) - B(\alpha) K(\alpha)] x \end{aligned} \quad (2.11)$$

E conjunto de controladores K é determinado através de desigualdades matriciais lineares que devem considerar os requisitos do sistema em todos as regras fuzzy definidas e seguir o teorema de Lyapunov (SOUZA et al., 2014). Fazendo assim o controlador capaz de levar a um ponto de equilíbrio em todas as condições iniciais. E para o caso da teoria de controlador fuzzy takashi-sugeno é definida como 2.12 (SOUZA et al., 2014).

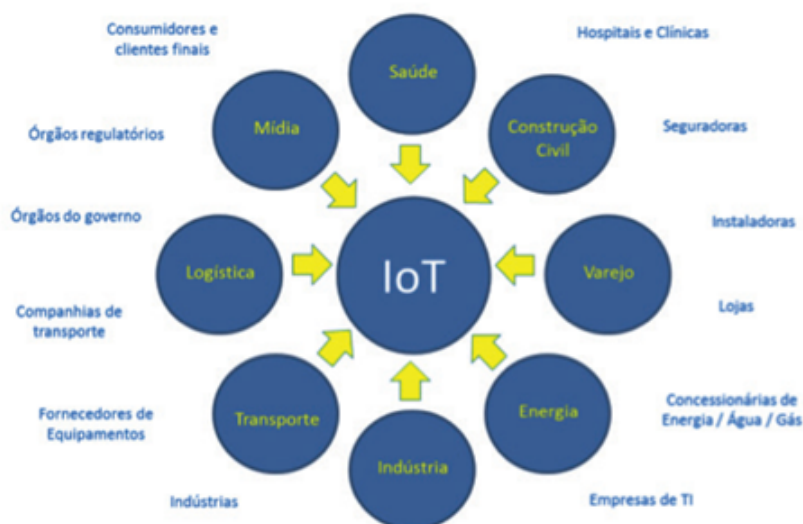
$$\begin{aligned} & \text{Exista uma matriz } X \text{ que :} \\ & X > 0 \\ & X A_i^T + A_i X - B_i M_i - M_i^T B_i^T < 0, \\ & (A_i + A_j) X + X (A_i + A_j)^T \\ & - B_i M_j - B_j M_i - M_i^T B_j^T - M_j^T B_i^T < 0, \\ & i < j \\ & \text{Em que } K_i = M_i X^{-1} \end{aligned} \quad (2.12)$$

## 2.2 Internet of Things

A internet das coisas, do inglês Internet of Things, ou sua sigla IoT, promete promover uma grande mudança na sociedade e nos negócios das empresas (TELECO, 2016). A extensão conexão entre o mundo real e o digital permitirá a otimização e automação de processos e trará um grande ganho para a economia (TELECO, 2016). Esta evolução permite uma melhora na qualidade dos processos e reduz riscos (TELECO, 2016). IoT é uma nova visão para a internet, em que a internet deixa de ter apenas computadores, e possui objetos do dia a dia conectados nela (FILHO, 2016).

Segundo a norma (IEEE. . . , 2020) existem inúmeras áreas que podem receber essa evolução, e ampliar o mercado, melhorar a qualidade e eficiência com informação advinda de componentes do sistema de internet das coisas. A figura 4 que ilustra os mercados participantes do ecossistema de iot.

Figura 4 – Mercado para o ecossistema da IoT.



**Fonte:** (FILHO, 2016).

Um exemplo que esse novo conceito está chegando em um ritmo acelerado é a área de energia, criando as smart grids, que através da conexão da rede com componentes IoT é possível medir a energia gerada por fontes renováveis em uma geração distribuída, o armazenamento, e o consumo com veículos elétricos, residências e indústria (TELECO, 2016). Criando assim um sistema mais econômico e eficaz (TELECO, 2016).

Outro caso é a indústria inteligente, conhecida como indústria 4.0, que traz inteligência, flexibilidade e dinâmica sobre todo processo de fabricação e produção. Com uma fábrica focada em um planejamento integrado e monitoramento que vai do desenvolvimento do produto, até receptividade do produto pelo cliente, fazendo as indústrias mais eficientes e responsivas a mudanças (IEEE. . . , 2020).



A Internet das Coisas não se trata de tecnologias, mas do uso delas para chegar ao seu objetivo, em que são as conexões, conexões que podem ser realizadas fisicamente através de cabos ou conexões sem fio (FILHO, 2016). Segundo a norma (IEEE... , 2020) que define que uma “coisa” em um componente ou sistema IoT tem funções, propriedade, e uma forma de se comunicar de acordo com a figura 5. E a informação que é trocada deve ser segura.

Figura 5 – A "Coisa".



**Fonte:** (IEEE... , 2020).

Os componentes em um sistema IoT são normalmente distribuídos e podem interagir com auxílio de redes comunicação, mesmo que internet das coisas não tenha um protocolo de comunicação definido, essa normalmente utiliza conexões baseadas em pacotes, com links ponta a ponta através de um gateway, que converte os pacotes de rede para a transmissão dos dados, como demonstrado na figura 6 (IEEE... , 2020; SILVA, 2018).

Figura 6 – Comunicação através do gateway.



**Fonte:** (SILVA, 2018).

A rede de internet das coisas utiliza três camadas: camada física, camada de rede e camada de aplicação (SILVA, 2018). Os protocolos de camada física que são usados podem ser divididos de acordo com o quadro 4.

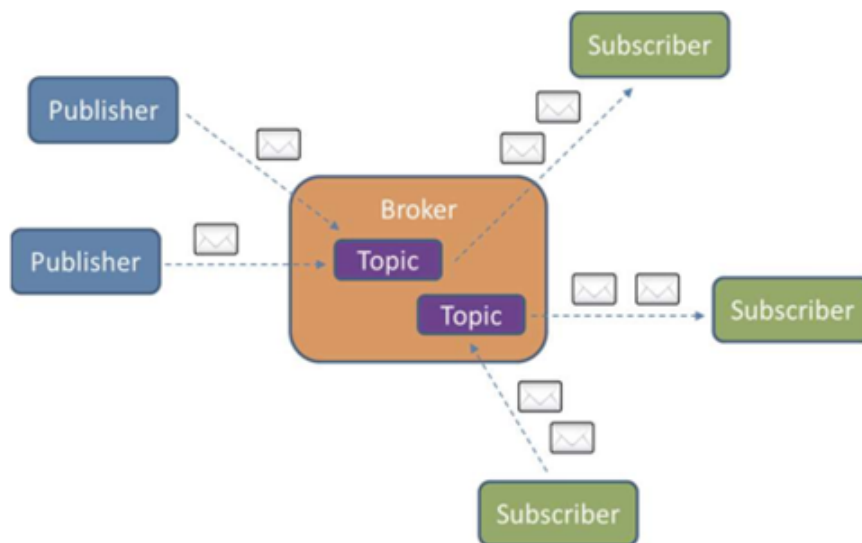
Quadro 4 – Protocolos da camada física de acordo com a distância e volume de dados.

	<i>Tempo de subida</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Tempo de Assentamento</i>	<i>Erro Estacionário</i>
$K_p$	Diminui	Aumenta	Pequena mudança	Diminui
$K_i$	Diminui	Aumenta	Aumenta	Diminui
$K_d$	Pequena mudança	Diminui	Diminui	Não muda

**Adaptado:** (SILVA, 2018).

A camada de rede é a responsável pela transmissão dos dados para a nuvem, normalmente utilizam os padrões IPv4, IPv6 ou para baixas potências o IETF IPv6 (SILVA, 2018). Enquanto na camada de aplicação utiliza-se protocolos conhecidos do TCP/IP como o protocolo HTTP (SILVA, 2018). Entretanto outros protocolos utilizados são MQTT, Message Queue Telemetry Transport, que funciona num padrão publish/subscribe, em que os dados são enviados pelos publishers a um broker que gerencia o acesso dos dados aos subscribes (SILVA, 2018). A fig 7 ilustra o funcionamento do MQTT.

Figura 7 – Estrutura de comunicação do MQTT.



**Fonte:** (SILVA, 2018).

Outro padrão da camada dessa camada é o CoAP, Constrained Application Protocol, que é normalmente utilizado em dispositivos de baixo uso de energia em redes restritas. Um protocolo para soluções de smart grid (SILVA, 2018).

## 3 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa foi dividida em duas seções, a primeira seção é metodologia utilizada para o desenvolvimento da planta, do hardware e firmware. A segunda seção está focada na metodologia utilizada para a implementação dos aplicativos de dispositivo móvel e web.

### 3.1 Metodologia da Planta, do Hardware e Firmware

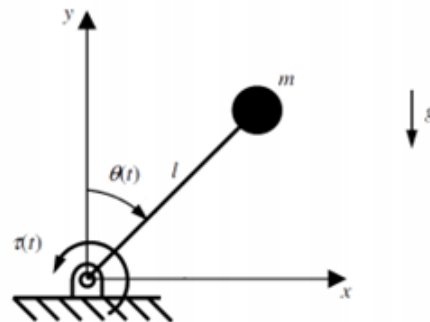
#### 3.1.1 Materiais

- Impressora 3D
- Duto de 10 mm de diâmetro e 40 cm de comprimento
- Esp32
- Câmera OV2640
- Motor DC 12V com caixa de redução
- Fonte 12V
- LM7805

#### 3.1.2 Metodologia

A planta definida para construção foi o pêndulo invertido, por sua facilidade construtiva e a fácil visualização do aluno dos resultados obtidos pela planta. O modelo seguido para o pêndulo invertido está ilustrado na figura 8. Ele é constituído de um motor preso a mesa e o pêndulo preso diretamente ao eixo do motor, facilitando a construção.

Figura 8 – Modelo pêndulo invertido



**Fonte:** (CARDIM, 2020b)

Modelou-se fisicamente a planta, para facilitar o desenvolvimento do aluno e para poder avaliar através de simulações os resultados obtidos nos testes da planta.

Foi elaborado um desenho 3D do pêndulo invertido, que foi construída em uma impressora 3D, e utilizou-se um duto de 10 mm de diâmetro para servir de pêndulo para planta, construído um encaixe para a possibilidade de alterar os pesos nesse duto. Foi elaborado um circuito eletrônico utilizando o microcontrolador esp32, para a conexão e controle da planta, nele está conectado a câmera que faz a transmissão, para controle do motor será realizado através dos pulsos de PWM e uma ponte H criada com o circuito integrado L9110S.

### 3.2 Metodologia dos aplicativos de dispositivo móvel e web.

Foi levantado os requisitos do sistema utilizando a o capítulo 2.1 - a revisão bibliográfica de controle e as necessidades do aluno e pesquisador, realizando entrevistas com alunos e professores que trabalham na área de controle. Assim foi elaborado a modelagem do sistema UML para determinar quais seriam as informações e classes necessárias no aplicativo e no banco de dados.

A linguagem de programação e o sdk de desenvolvimento, foram utilizadas o dart e o flutter respectivamente, por ser uma linguagem fácil, em desenvolvimento pela google e por ser capaz de desenvolver nativamente aplicações para mobile, web e desktop em um simples código. Foi escolhido a plataforma Firebase do Google como o serviço de backend, utilizando os seus produtos como cloud functions, autenticação, cloud messaging, hospedagem, cloud storage e cloud firestore, para facilitar o desenvolvimento do aplicativo, por ser facilmente integrado ao flutter e hospedar o aplicativo web desenvolvido e seu banco de dados.

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Desenvolvimento da Planta, Hardware e Firmware

#### 4.1.1 Modelagem Física

A equação física da planta que define o comportamento do modelo da figura 8, deve levar em que a soma do torque pela sua movimentação

$$ml^2\ddot{\theta}(t) \quad (4.1)$$

E torque criado relação da força peso em relação ao seu ângulo

$$mgl \sin \dot{\theta}(t) \quad (4.2)$$

Tenha que ser contra balanceado com o torque gerado pelo motor preso à mesa  $\tau_{motor}$ . A equação 4.5 demonstra a equação de comportamento utilizando as equações 4.1 e 4.2.

$$ml^2\ddot{\theta}(t) + mgl \sin \dot{\theta}(t) = \tau_{motor} \quad (4.3)$$

Para determinar o sistema na forma de espaço de estados fica:

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t) = \dot{\theta}(t) \\ \ddot{\theta}(t) = \frac{-g \sin \dot{\theta}(t)}{l\theta(t)} + \frac{\tau_{motor}}{ml^2} \end{cases} \quad (4.4)$$

Reescrevendo a equação 4.4 na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-g \sin \dot{\theta}(t)}{l\theta(t)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\tau_{motor}}{ml^2} \end{bmatrix} u(t) \quad (4.5)$$

#### 4.1.2 Desenvolvimento da Planta

O modelo 3D do pêndulo invertido está ilustrado na figura 9. O pêndulo invertido possui duas partes, uma onde fica o hardware e a câmera, para o aluno observar o experimento de maneira remota, e a outra onde o motor e o pêndulo presos na mesa.

Figura 9 – Modelo 3D do pêndulo invertido.



**Fonte:** Elaboração própria.

O duto que serve de pêndulo é possui 40 cm de comprimento, e 10 mm de diâmetro, e que fica preso diretamente ao eixo do motor através de um acoplamento.

## 5 CRONOGRAMA

Segue abaixo o cronograma das atividades que serão executadas até a Avaliação Final de TCC.

		MESES												
		nov/20	dez/20	jan/21	fev/21	mar/21	abr/21	mai/21	jun/21	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21
Atividades	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	2				X									
	3				X	X								
	4	X	X											
	5				X	X								
	6		X	X										
	7					X	X							
	8						X	X	X					
	9								X	X				
	10									X	X			
	11										X	X		
	12											X	X	
	13												X	X

1. Realizar revisão bibliográfica;
2. Identificar requisitos;
3. Modelar sistema;
4. Definição da planta;
5. Construção da planta;
6. Modelagem da planta;
7. Teste da planta;
8. Backend;
9. Desenvolvimento do aplicativo móvel;
10. Testes com aplicativo móvel;
11. Desenvolvimento do aplicativo web;
12. Teste com aplicativo web;
13. Ensaaios e Testes com a planta.





# REFERÊNCIAS

ASSUNÇÃO, E. **Projeto de Controladores Robustos H2 ou H via LMI:Controle Robusto**. 2018. Material de aula 4. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

ASSUNÇÃO, E. **Projeto de Controladores Robustos H2 ou H via LMI:Estabilidade**. 2018. Material de aula 3. Citado na página 21.

CARDIM, R. **Análise e Projeto de sistemas de controle fuzzy Takashi-Sugeno via LMI:Introdução aos Modelos Fuzzy Takashi-Sugeno**. 2020. Material de aula 1. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

CARDIM, R. **Controle Fuzzy TS de um Pêndulo Invertido**. 2020. Material de aula. Citado na página 28.

FILHO, M. F. **Internet das coisas : livro digital**. Palhoça: UnisulVirtual, 2016. 56 p. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

IEEE Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things (IoT). **IEEE Std 2413-2019**, p. 1–269, March 2020. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

MESSNER, B. et al. **Introduction: PID Controller Design**. 2019. Disponível em: <<https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&section=ControlPID>>. Acesso em: 13 de jan. de 2020. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010. 809 p. Citado 5 vezes nas páginas 15, 17, 18, 19 e 20.

SERENI, B. **Static Output Feedback Control for LPV and Uncertain LTI Systems**. Dissertação (Mestrado) — UNESP, Ilha Solteira, 2019. Citado na página 18.

SILVA, E. D. **A Importância das atividades Experimentais na Educação**. Dissertação (Mestrado) — AVM Faculdade Integrada, Rio de Janeiro, 2017. Citado na página 15.

SILVA, M. D. Estação iot para monitoramento da temperatura e umidade do interior de veículos. 04 2018. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

SOUZA, W. et al. Robust switched control design for nonlinear systems using fuzzy models. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2014, n. 1, p. 1–11, 2014. Citado na página 23.

TELECO. **Relatório do Projeto IoT Brasil**. 2016. Disponível em: <[http://www.telebrasil.org.br/component/docman/doc\\_download/1569-apresentacao-do-projeto-lot-brasil?Itemid=>](http://www.telebrasil.org.br/component/docman/doc_download/1569-apresentacao-do-projeto-lot-brasil?Itemid=>)>. Acesso em: 21 de jan. de 2020. Citado na página 24.