



JOÃO GUILHERME MORAIS SANTOS

**CONTROLE DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO
PNEUMÁTICA UTILIZANDO VISÃO COMPUTACIONAL E
ARMAZENAMENTO DE DADOS NA NUVEM**

JOÃO GUILHERME MORAIS SANTOS

**CONTROLE DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO
PNEUMÁTICA UTILIZANDO VISÃO COMPUTACIONAL E
ARMAZENAMENTO DE DADOS NA NUVEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Alejandro Carvajal Flórez

São Luís
2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a)
autor(a).

Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

MORAIS SANTOS, JOÃO GUILHERME.

Controle de um sistema de levitação pneumática utilizando
visão computacional e armazenamento de dados na nuvem /

JOÃO GUILHERME MORAIS SANTOS. - 2022.

72 f.

Orientador(a): FABIO ALEJANDRO CARVAJAL FLÓREZ.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

1. Controlador PID. 2. Indústria 4.0. 3. Internet das
Coisas. 4. Levitação Pneumática. 5. Visão
Computacional. I. CARVAJAL FLÓREZ, FABIO ALEJANDRO.
II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FABIO ALEJANDRO CARVAJAL FLÓREZ
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO P. RODRIGUES
COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. MARCELO FÁBIO LEONARDO
COEQ/CCET/UFMA

29 de julho de 2022

DADOS CURRICULARES

João Guilherme Morais Santos

NASCIMENTO	12/03/1997 – SÃO LUIS / MA
FILIAÇÃO	Jurandir Santos Pereira Flávia Alessandra Santos Morais
2016/2022	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha avó, que sempre sonhou com esse momento.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus, pois sem ele não estaríamos aqui e por todas as bênçãos que realizou e irá realizar em minha vida.

Agradeço a toda minha família, que são tantos que não caberiam numa única página, por transformarem na pessoa que eu sou, por sempre me incentivarem e me apoiarem de todas as formas possíveis sem medir esforços, sou muito grato a todos vocês. Em especial, gostaria de agradecer a minha avó, Waldelice de Olinda Santos que me criou e me cria como filho, por todos os seus direcionamentos e por ser uma das pessoas que mais torcem pelo meu sucesso. Te amo, vó! Dedico este trabalho a você.

As mulheres guerreiras que tanto me inspiram e que sempre lutaram por mim, principalmente pela minha educação, Marina, Lídia, Loudemar e Carmita.

Ao meu querido avô, Gilmar Araújo Moraes, que não se encontra mais conosco, mas até hoje me inspira e alegra meus pensamentos. Te amo, vovô Gil!

Ao meus pais, Jurandir e Flávia pelo esforço e dedicação.

A família que ganhei e que irei construir com minha amada namorada e futura esposa, Laíse, pessoa com quem compartilho sonhos e desejos, os quais me fortalecem todos os dias para concluir este trabalho.

Aos meus amigos da universidade Ana, Anderson, Alan, Nathália e em especial a Bruna, que ao longo de todos esses anos compartilhamos muitos momentos e juntos conseguimos concluir essa grande etapa em nossas vidas.

Ao meu orientador, Prof. Fábio Carvajal, que abriu as portas do LIAP e me orientou desde a iniciação científica ao presente trabalho.

Ao professores do curso de Engenharia Química, pelos ensinamentos e orientações.

Aos que ficaram ao longo do caminho e aos que já se foram.

A todos vocês, meu muito obrigado.

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Filipenses 4:13

SANTOS, JOÃO GUILHERME MORAIS. **Controle de um sistema de levitação pneumática utilizando visão computacional e armazenamento de dados na nuvem**. 2022. 72. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

RESUMO

Os desafios gerados pela indústria 4.0 impulsionam a implementação de diversas tecnologias para se obter processos mais controlados, os quais se tornam cada vez mais complexos devido a essas tecnologias disruptivas. Isso abre um leque de possibilidades para o desenvolvimento de estratégias de controle que agregam ferramentas que trarão mais eficiência, sustentabilidade e a descentralização nas tomadas de decisões dentro dos processos industriais atuais. Neste contexto, esse trabalho integra tecnologias de alta impacto da indústria atual como visão computacional e Internet das Coisas, para o controle e monitoramento de um sistema de levitação pneumática. Um controlador PID foi implementado como estratégia de controle, sendo sintonizado pelo método de Ziegler – Nichols em malha fechada, seguido de um ajuste fino e retroalimentado com a altura do objeto no levitador extraída por um processamento digital de imagem. O processamento de imagem, controle da bancada, conexão com a plataforma IoT e a interface homem-máquina foram desenvolvidos no software LabVIEW®, já o compartilhamento de dados na nuvem foi realizado com a plataforma *ThingSpeak*. Foi realizada uma comparação do desempenho de controlador P, PI e PID, e a partir de índices de desempenho, o controlador proporcional (P) foi escolhido como melhor estratégia de controle para a bancada, apresentando resultados satisfatórios. Por fim, os dados do sistema foram compartilhados na nuvem, com a possibilidade de serem visualizados em tempo real e de forma remota. No entanto, a limitação da versão gratuita da ferramenta gera um atraso no envio de dados prejudicando a análise em tempo real. Contudo, o trabalho consegue mostrar o potencial das ferramentas para o controle de processos, possibilitando aplicações futuras com melhorias.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Internet das Coisas, Visão Computacional, Controlador PID, Levitação Pneumática.

SANTOS, JOÃO GUILHERME MORAIS. **Control of a pneumatic levitation system using computer vision and cloud data storage.** 2022. 72 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

ABSTRACT

The challenges generated by Industry 4.0 drive the implementation of various technologies to obtain more controlled processes, which become increasingly complex due to these disruptive technologies. This opens a range of possibilities of control strategies that add tools that will bring more efficiency, agility, sustainability and the decentralization of decision-making within current industrial processes. In this context, this work integrates high-impact technologies from the current industry, such as computer vision and Internet of Things, for the control and monitoring of a pneumatic levitation system. A PID controller was implemented as a control strategy, being tuned by the closed loop Ziegler – Nichols method, followed by a fine adjustment and feedback with the height of the object in the levitator extracted by a digital image processing. Image processing, bench control, connection to the IoT platform and the human-machine interface were developed in LabVIEW® software, while data sharing in the cloud was performed with the ThingSpeak platform. A comparison of P, PI and PID controller performance was performed. Through performance indices, the proportional controller (P) was chosen as the best control strategy for the bench, showing satisfactory results. Finally, the system data was shared in the cloud, with the possibility of being viewed in real time and remotely. Nonetheless, the limitation of the free version of the tool causes a delay in sending data impairing real-time analysis. However, the work manages to show the potential of the tools for process control, enabling future applications with improvements.

Keywords: Industry 4.0, Internet of Things, Computer Vision, PID Controller, Pneumatic Levitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático de um levitador pneumático	04
Figura 2 – Princípio de Bernoulli	05
Figura 3 – Exemplificação do efeito Coanda	06
Figura 4 – Componentes de um sistema de visão computacional	10
Figura 5 – Representação matricial de uma imagem 4 x 5 pixels	12
Figura 6 – Etapas do processamento digital de imagens	12
Figura 7 – Revoluções Industriais	16
Figura 8 – Arquitetura da IoT conforme a IEEE	17
Figura 9 – Arquitetura proposta.....	18
Figura 10 – Arquitetura proposta pra Automação e Controle em nuvem	19
Figura 11 – Visão geral de uma nuvem computacional	20
Figura 12 – Bancada Experimental	23
Figura 13 – Sistema motor-ventilador	23
Figura 14 – Inversor de frequência.....	24
Figura 15 – Câmera digital LifeCam HD-300.....	26
Figura 16 – Configuração interna da NI myRIO -1900.....	27
Figura 17 – Entradas usadas na placa NI myRIO -1900	28
Figura 18 – Interface home-máquina no LabVIEW	29
Figura 19 – Código fonte no LabVIEW	29
Figura 20 – Processamento Digital de Imagem no LabVIEW	30
Figura 21 – Bloco ExtractSingleColorPlane VI	31
Figura 22 – Bloco IMAQ LogDiff VI	31
Figura 23 – Bloco IMAQ Threshold VI	32
Figura 24 – Bloco IMAQ RemoveParticle VI.....	32
Figura 25 – Bloco IMAQ RejectBorder VI	33
Figura 26 – Bloco IMAQ Particle Analysis VI	33
Figura 27 – Bloco IMQ Overlay Rectangle VI	33
Figura 28 – Imagem digital de resolução 640 x 480 pixel	34
Figura 29 – Malha de controle da Bancada Experimental.....	35
Figura 30 – Controlador PID no LabVIEW	36
Figura 31 – PID Advanced VI.....	36
Figura 32 – Bloco GET.vi	38

Figura 33 – Envio de dados para o <i>ThingSpeak</i>	39
Figura 34 – Resultado do processamento de imagem no LabVIEW®	40
Figura 35 – Resposta oscilatória da variável de saída	41
Figura 36 – Comportamento controle P	43
Figura 37 – Comportamento controle PI	43
Figura 38 – Comportamento controle PID	43
Figura 39 – Gráficos do <i>setpoint</i> e da <i>PV</i> da altura do corpo levitante no site do <i>ThingSpeak</i>	45
Figura 40 – Gráficos do tensão no inversor de frequência e do saída de controle no site do <i>ThingSpeak</i>	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parametrização do inversor de frequência.....	24
Tabela 2 – Sintonia segundo Ziegler e Nichols (1942)	37
Tabela 3 – Ganhos dos controladores P, PI, PID pelo método de Ziegler - Nichols	41
Tabela 4 – Ganhos dos controladores P, PI, PID com ajuste fino.....	41
Tabela 5 – Comparação de desempenho dos controladores	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CV	Cavalo-vapor
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IAE	Integral do valor absoluto do erro
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
IoT	Internet das Coisas ou Internet of Things
IPDT	Integral plus dead-time
ISE	Integral do Erro quadrático
ITAE	Integral do valor absoluto do erro multiplicado pelo tempo
MAE	Média do erro absoluto
MRAC	Model Reference Adaptive Controller
MSE	Média do erro quadrático
MV	Variável manipulada
P	Proporcional
PI	Proporcional-integrativo
PID	Proporcional-integral-derivativo
PIXEL	Picture Element
PV	Variável de processo
RGB	Red, Green, Blue
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
RPM	Rotação por minuto
SIMC	Simple Internal Model Control
SP	Valor de referência
TI	Tecnologia da Informação
TITO	Two-input, two-output
URL	Uniform Resource Locator
VI	Instrumento Virtual
WIFI	Wireless Fidelity
WNCS	Wireless Networked Control Systems

LISTA DE SÍMBOLOS

p_0	pressão de fluxo
p_∞	pressão ambiente
a	raio da superfície curva
b	largura da abertura
e	erro
g	gravidade local
Hz	hertz
K_c	ganho do controlador
K_u	ganho crítico
Mp	máximo sobressinal (ou apenas sobressinal)
P	pressão
P_u	período crítico
T	limiar
t	tempo
t_d	tempo derivativo
t_i	tempo integrativo
u	imagem digital
U	velocidade média
V	velocidade
z	altura
ρ	massa específica

SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO.....	ii
	DADOS CURRICULARES.....	iii
	DEDICATÓRIA.....	iv
	AGRADECIMENTOS.....	v
	EPÍGRAFE.....	vi
	RESUMO.....	vii
	ABSTRACT.....	viii
	LISTA DE FIGURAS.....	ix
	LISTA DE TABELAS.....	x
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xi
	LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
	SUMÁRIO.....	xiii
1	INTRODUÇÃO.....	01
2	OBJETIVOS.....	02
2.1	Objetivos gerais.....	02
2.2	Objetivos específicos.....	02
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
3.1	Levitação pneumática.....	03
3.2	Princípios fundamentais.....	04
3.2.1	Princípio de Bernoulli.....	04
3.2.2	Efeito Coanda.....	05
3.3	Controle de levitador pneumático.....	07
3.4	Visão computacional.....	09
3.4.1	Sistema de visão computacional.....	09
3.4.1.1	Imagem digital.....	11
3.4.1.2	Processamento digital de imagens.....	12
3.4.2	Visão computacional na indústria.....	14
3.5	Indústria 4.0.....	15
3.5.1	Internet das coisas.....	16
3.5.1.1	Arquitetura para IoT.....	17

3.5.1.2	Cloud computing.....	20
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1	Material.....	22
4.2	Local da pesquisa.....	22
4.3	Instrumentos/equipamentos/software utilizados.....	22
4.3.1	Bancada Experimental.....	22
4.3.2	Sistema de Aquisição de dados.....	26
4.3.3	Software LabVIEW.....	28
4.3.4	ThingSpeak.....	29
4.4	Análises, métodos e procedimentos experimentais.....	30
4.4.1	Processamento Digital de Imagens.....	30
4.4.2	Técnica de Controle de Processo.....	34
4.4.3	Técnica de Sintonia dos ganhos.....	37
4.4.4	Critério de desempenho.....	37
4.4.5	Compartilhamento de dados na nuvem.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1	Processamento digital de imagem.....	40
5.2	Sintonia e ajuste fino dos controladores P, PI e PID.....	41
5.3	Desempenho dos controladores P, PI e PID.....	42
5.4	Compartilhamento de dados na nuvem.....	45
6	CONCLUSÃO.....	47

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da indústria, surgiu a necessidade de obter processos de produção cada vez mais estáveis. Baseado nesta demanda, o controle automático de processo adveio para auxiliar a indústria a cumprir especificações de qualidade dos produtos mais restritas, cumprindo requisitos de segurança e ambientais, bem como o aumento da competitividade do mercado, auxiliando assim, a redução de custos operacionais (SEBORG et al, 2004).

Nos anos recentes, a grande inovação em processos tem sido denominada Indústria 4.0, tida como tão impactante quanto a substituição das carroças pelo automóvel no início do século XX. O termo “Indústria 4.0” tem sido considerado como a Quarta Revolução Industrial. Essa nova tendência utiliza os conceitos da internet das coisas (IoT) aliada à automatização industrial, que agrega inteligência à manufatura e um universo de possibilidades para diferentes fabricantes, produzindo de acordo com os requisitos dos clientes (PACCHINI, 2020).

De acordo com Azevedo *et al.* (2020), a indústria 4.0 tem a propensão de introduzir a digitalização e automação no ambiente de manufatura, ditando a conexão de máquinas, sistemas e ativos, oferecendo então um ambiente controlado e autônomo. Essas inovações são frutos da combinação dessas tecnologias de comunicação e informação com a automação industrial. Produtos e serviços são potencializados pela inclusão tecnológica, a utilização de novos materiais e novos sensores para monitoramento, dessa forma agregam valores ao produto e isto é percebido pelo cliente (COELHO, 2016; SANTOS *et al.*, 2018).

A automação industrial presencia uma nova geração com o desenvolvimento da indústria 4.0. A quarta geração industrial permitirá que sensores, máquinas, processos e pessoas conectem-se como uma comunidade colaborativa. Com o sistema cibernético-físico, cria-se uma plataforma que possibilita a interação entre sistemas de diferentes naturezas. A internet das coisas conecta o mundo físico das máquinas com o mundo cibernético da internet (SILVA, 2017).

Somando às potencialidades da IoT a outras tecnologias de alto impacto como a visão computacional, obtém-se um amplo campo de aplicações inovadoras. Neste trabalho, foi desenvolvido um protótipo de um sistema de controle de um levitador pneumático utilizando a visão computacional clássica, como sensor de feedback com um algoritmo de processamento de imagem digital em um controlador clássico e usando uma plataforma de IoT, *ThingSpeak*, para agregar, visualizar e analisar as leituras dos parâmetros do sistema em tempo real, utilizando a flexibilidade que fornece o programa LabVIEW®.

2 OBJETIVOS

Com o passar do tempo as indústrias se tornaram mais complexas e o mercado mais competitivo, em vista disso, novas tecnologias surgiram para lidar com essas dificuldades. Atualmente a indústria 4.0 impõe tecnologias disruptivas no mercado, com a digitalização dos processos produtivos, novas ferramentas são empregadas para aumentar a eficiência, segurança e competitividade das indústrias em um ambiente tão volátil.

O desenvolvimento deste trabalho contribui para compreensão e utilidade de novas tecnologias aplicadas aos processos indústrias modernos, ferramentas como visão computacional e internet das coisas serão empregadas, tecnologias que quando integradas apresentam grande potencial.

2.1 Objetivo geral

Desenvolver o controle e monitoramento de uma planta de levitação pneumática, empregando tecnologias que forneçam soluções inovadoras frente aos desafios da indústria 4.0, como a visão computacional e Internet da coisas (IoT), demonstrando seu potencial de aplicação nos processos industriais.

2.1 Objetivos específicos

- Montagem da bancada experimental de um levitador pneumático;
- Processamento Digital de imagens para extração de informações;
- Controle da bancada experimental, aplicando estratégia de controle PID e sintonia pelo método de Ziegler-Nichols;
- Compartilhamento de dados na nuvem;
- Realização de testes experimentais para verificar o funcionamento do sistema e desempenho do controlador;
- Validação do uso da tecnologias propostas através das análises dos resultados obtidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será exposto o levantamento bibliográfico a respeito das tecnologias cruciais para o desenvolvimento da temática do trabalho. Inicialmente, o texto aborda a levitação pneumática, os fenômenos que regem nesse processo, seu controle e aplicações, em seguida é apresentado uma visão geral sobre Visão computacional, Indústria 4.0, Internet da Coisas e Computação em nuvem.

3.1 LEVITAÇÃO PNEUMÁTICA

Levitação pneumática é o processo pelo qual um objeto é erguido sem suporte mecânico em uma posição estável, provendo através de um fluxo de ar uma força para cima que se contrapõe à força gravitacional exercida no objeto. Uma das vantagens de utilizar a levitação pneumática para esse tipo de atividade, é que possui baixo atrito, além de não existir contato com as partes mecânicas (NETO *et al*, 2020).

De acordo com Delettre *et al* (2010) muitas empresas exigem transporte e posicionamento de objetos delicados ou limpos, sem contato com os mesmos. O manuseio de componentes estruturados delicados, recém pintados, quentes, sensíveis ou de tamanho microm, se torna viável com a levitação pneumática pois o contato mecânico é evitado. Além disso, o método de levitação pneumática é mais vantajoso que métodos de levitação elétrica ou magnética, pois estes são restritos a materiais condutores e a força de elevação depende das propriedades do material, enquanto na pneumática abordagens de levitação usam o fluxo de ar para aplicar uma força a uma peça de trabalho.

Os sistemas de levitação têm um grande número de aplicações como transporte de materiais ou posição do produto (DELETTRE *et al*, 2012). Além disso, este sistema particular de levitação do ar é interessante do ponto de vista da aerodinâmica, uma vez que permite ao usuário realizar diferentes estudos de forma simples e econômica (CASTILLO *et al*, 2017).

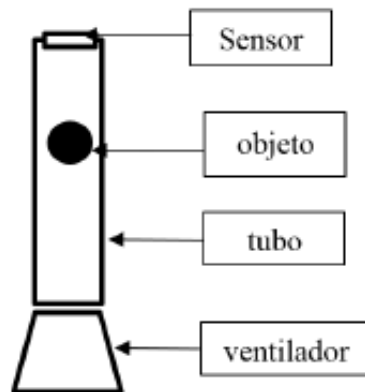
Utilizando esse princípio, os levitadores pneumáticos têm sido uma planta didática para estudo de sistemas de controle automático largamente utilizados tanto como uma plataforma didática para o ensino de teoria de controle como, também, um benchmark para leis de controle avançadas, adaptativas e não-lineares (TAKÁCS *et al*, 2020).

Em particular, tais sistemas apresentam dinâmicas rápidas, que os tornam especialmente interessantes para experimentos de laboratório de controle. Adicionalmente, este tipo de sistema

pode ser construídos de forma relativamente barata em termos de custo e esforço, desde que se esteja disposto a abrir mão de um pouco de exatidão no sistema (CHACON *et al*, 2017).

A figura 1 mostra os blocos de um levitador pneumático composto por um sensor de distância, seja ultrassônico ou laser, como objeto levitando uma esfera de material leve como isopor, um tubo de acrílico transparente que permite visualizar a elevação do objeto e um ventilador (CHITODE, 2008).

Figura 1 – Diagrama esquemático de um levitador pneumático.



Fonte: Chitode (2008).

3.2 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

Nesta seção serão apresentados os princípios fundamentais que regem os sistemas de levitação pneumática.

3.2.1 Princípio de Bernoulli

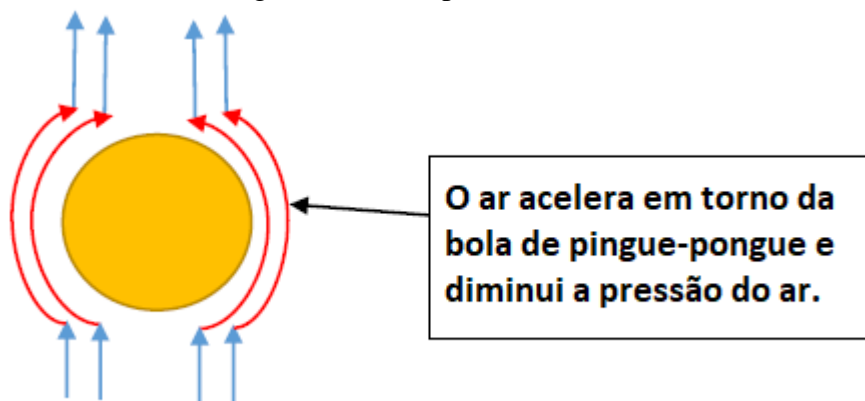
O princípio de Bernoulli, descrito por Daniel Bernoulli, matemático holandês do Século XVIII, descreve o comportamento de um fluido a partir de princípios de conservação de energia. A dedução de tal princípio envolve o balanço de quantidade de movimento em um elemento de fluido e sua integração ao longo de uma corrente (ou linha de fluxo). O seu resultado pode ser interpretado como um balanço de energia mecânica (em um sistema conservativo, ou seja, desprovido de dissipação de energia) (GOBBI *et al*, 2006). Matematicamente, pode ser expresso pela equação (1).

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{constante} \quad (1)$$

onde V é a velocidade, P , a pressão, ρ , a massa específica do fluido, g , gravidade local e z , a altura. Cada parcela dessa equação pode ser associada a uma forma de energia. Tal princípio pode ser enunciado da seguinte forma: “Se a velocidade de uma partícula de um fluido estiver aumentando enquanto a mesma escoar ao longo de uma linha de corrente, a pressão desse fluido deve diminuir e se sua pressão aumenta, sua velocidade deverá diminuir”. Nesse caso, quando o fluido passa por um corpo, tão maior será a velocidade, quanto menor for a diferença de pressão (YOUNG E FREEDMAN, 2008).

Por exemplo, um fluxo de ar de alta velocidade aplicado ao tubo contendo uma bola. Quando o ar atinge a bola, ele será direcionado para o lado da bola aumentando assim a velocidade da bola e simultaneamente reduzindo a pressão ao redor da bola. A bola ficará no centro do fluxo, onde a pressão é mais baixa, pois a pressão muito mais alta em torno dela a empurra para área de baixa pressão (OMAR, 2018). Devido a esse gradiente de pressão, a bola sempre irá se deslocar da região com maior pressão para a região de menor pressão, se mantendo então no centro do fluxo de ar.

Figura 2 – Princípio de Bernoulli.



Fonte: Omar (2018).

O princípio de Bernoulli também explica a sustentação em uma asa de avião, indicando que onde quer que a velocidade seja relativamente alta, a pressão deve ser relativamente baixa e onde quer que a velocidade seja relativamente baixa, a pressão deverá ser relativamente alta gerando uma substancial sustentação (FOX *et al*, 2000).

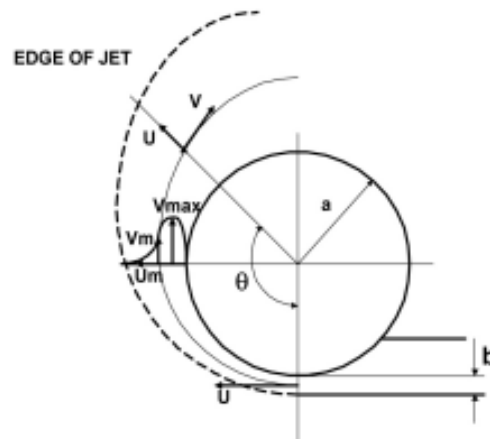
3.2.2 Efeito Coanda

O efeito de Coanda em descrição simples, é a tendência de um fluido em aderir a uma superfície curva devido à redução de pressão local, pela aceleração de um fluido em torno de uma superfície (DE LIMA LEMOS *et al*, 2018).

Conforme a figura 2 acima, o efeito Coanda pode ser visto ao longo da linha vermelha que aparece na lateral da bola. O ar se divide quando atinge a bola e flui ao longo do lado curvo dela e se encontra no lado final da bola (OMAR, 2018).

Segundo Trancossi (2011) o efeito de adesão Coanda é uma consequência direta do equilíbrio das forças aplicadas no fluido. Durante o movimento adesivo em uma parede curva, eles são a força centrífuga e a pressão radial. A figura 3 esquematiza esse efeito. À medida que o jato sai da abertura, a pressão de contato com a parede curva é inferior à pressão ambiente devido a presença de fenômenos de arrasto viscoso gerados pela interação do fluido e a parede curva. Este diferencial de pressão é a principal causa da adesão do jato de fluido a uma superfície de parede curva.

Figura 3 – Exemplificação do efeito Coanda.



Fonte: Trancossi (2011).

Assumindo que o escoamento é inicialmente invíscido, a fórmula que descreve o comportamento da pressão do fluxo é derivado da equação de Bernoulli:

$$p_0 = p_\infty - \frac{\rho \cdot U^2 \cdot b}{a} \quad (2)$$

em que ρ é a densidade do fluido do jato, U é a velocidade média do jato, b a largura da abertura, a o raio da superfície curva e p_∞ a pressão ambiente. Assim a pressão do fluido junto à parede, em escoamento invíscido, é inferior à pressão ambiente quando:

$$\frac{\rho \cdot U^2 \cdot b}{a} \leq p_\infty \quad (3)$$

Ao longo do último quarto do século, o princípio de Coanda tornou-se cada vez mais usados em uma ampla variedade de aplicações, incluindo industrial, medicinal, tecnologia marítima e aerodinâmica. Além disso, seu efeito tem sido cada vez mais observado no mundo natural. As áreas primárias onde o princípio de Coanda tem sido usado com grande efeito em aplicações industriais estão em turbinas de reação de atomizadores de turbilhão e técnicas de galvanização, resfriamento de cilindros e dispositivos de lógica de fluidos.

3.3 CONTROLE DE LEVITADOR PNEUMÁTICO

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos relacionados ao controle de sistemas de levitação pneumática. Diversas aplicações com fins educacionais e análise de novos métodos e leis de controle são explorados.

Rodríguez-Zalapa *et al* (2017), utilizaram um controle fuzzy para contornar os problemas que os controladores convencionais enfrentam quando há uma variação do setpoint de posição vertical em um sistema de levitação pneumática, situação em que tais sistemas apresentam comportamentos dinâmicos incertos não-lineares. Foi realizado uma comparação do desempenho de controlador PD, PI e PID e um controlador fuzzy nas mesmas condições. Os autores utilizaram uma webcam como sensor de feedback com um algoritmo de processamento de imagem, o algoritmo funcionou bem, porém houve um atraso de tempo que afetou o controlador de resposta, devido ao método de segmentação de imagem implementando no trabalho, tal dificuldade pode ser evitada com um sensor com melhor tempo de resposta.

Chacon *et al.* (2017), apresentaram um estudo sobre diferentes controladores PI não-lineares usando um sistema educacional de levitação pneumática de baixo custo, que pode ser usado como laboratório virtual ou remoto. A posição da bola foi mensurada com um sensor de infravermelho. Na plataforma, há uma placa de aquisição de dados Arduino que executa o controlador do sistema e é facilmente extensível para desenvolver e testar novas leis de controle, sem se preocupar com outros detalhes de implementação como o registro de dados, protocolos

de comunicação etc. Além disso, o sistema de controle está preparado para ser estendido com controladores mais sofisticados sem muito esforço de desenvolvimento.

No trabalho de Fonseca Neto *et al* (2020) foi desenvolvido um sistema de levitação pneumática para fins didáticos, que possuía um sistema supervisório de forma online. No projeto foi apresentado um controlador PID responsável pelo controle da posição do objeto no sistema, para efetuar as leituras de altura foi utilizado um sensor ultrassônico e uma ventoinha de corrente contínua foi responsável por gerar o fluxo de ar que desloca o objeto verticalmente. Além disso, foi feito um levantamento do modelo matemático do sistema e obtido sua função de transferência, que possibilitou realizar uma análise da dinâmica do sistema de levitação por meio do software MATLAB Simulink.

Souza *et al.* (2020) apresentaram o primeiro levitador pneumático reverso, onde o motor é posicionado na parte superior do tubo, sugando o ar de dentro do tubo. Os autores identificaram que a modelagem do sistema é equivalente ao do levitador convencional, o que permite o uso de técnicas de controle, já estabelecidas para os sistemas convencionais. Nesse trabalho os autores realizaram a sintonia de um controlador PI através do método SIMC (Simple Internal Model Control), obtendo uma resposta dinâmica estável, capaz de rastrear o setpoint e rejeitar perturbações.

Souza *et al.* (2021) foram além e constroem um sistema de levitação duplo reverso acoplado. O sistema consiste em duas torres acopladas pneumaticamente, de modo que um atuador interfira no outro. O sistema foi identificado com um IPDT (Integral plus dead-time) TITO (Two-input, two-output). Foram então projetados controladores PI, além dos desacopladores. Com a sintonia dos controladores PI, conseguiu-se uma resposta capaz de rastrear o setpoint e rejeitar perturbações, porém bastante oscilantes. Ao aplicar o desacoplador do tipo foward, os autores obtiveram uma resposta mais rápida e menos oscilante

As oscilações são causadas pelo conflito entre os dois controladores. Em comparação com o regime transitório, que aparece após uma perturbação degrau, o regime permanente apresenta menos oscilações, nesse caso há uma pequena influência entre os dois sistemas, no entanto, a amplitude das oscilações em regime permanente são atenuadas expressivamente. As métricas de desempenho ISE (Integral do erro quadrático) e o ITAE (integral do valor absoluto do erro ponderado no tempo), indicaram que o controlador sem o desacoplador teve o pior desempenho (SOUZA *et al*, 2021)

Bomfim *et al.* (2021) propuseram uma nova abordagem de controle híbrido, PID + MRAC. O MRAC (Model Reference Adaptive Controller), é dividido em três partes: um controlador feedforward, uma parte derivativa e um feedback ordinário. A porção feedforward

tem como objetivo rejeitar distúrbios indesejáveis. A parte derivada aumenta a estabilidade do sistema e a realimentação ordinária torna o erro nulo em regime permanente (Bomfim et al, 2021). A lei de controle foi criada a partir da teoria do matemático e físico Alexander Lyapunov. A abordagem foi desenvolvida para compensar as não linearidades, alta oscilação e distúrbios de rejeição em sistemas de levitação pneumática.

Ainda nesse trabalho os autores realizam uma comparação do controle híbrido, Hybrid-MRAC, e um controlador PID Adaptive de uma referência na literatura. As simulações e experimentos realizados demonstram que o controle proposto no trabalho apresentam melhores resultados do que o A-PID. A média absoluta (MAE) foi 51,25% menor, a média quadrada (MSE) foi 51,65% e a raiz quadrada média (RMSE) 31,40%. Tal desempenho deve-se ao fato do A-PID necessitar de um tempo para a convergência dos parâmetros de ajuste, o que acaba deteriorando a eficiência do sistema de controle nos instantes iniciais da aplicação dos degraus (BOMFIM *et al*, 2021).

3.4 VISÃO COMPUTACIONAL

A Visão Computacional é uma aplicação da Inteligência Artificial que visa mimetizar a visão humana. Esse ramo desenvolve sistemas artificiais, seja hardware ou software, que adquirem informações de imagens ou quaisquer dados com múltiplas dimensões.

Ela extrai muitas informações de imagens capturadas por câmeras, sensores, *scanners* e outros dispositivos. Essas informações permitem identificar, manipular e considerar os objetos que compõem a imagem (BAREELOS, 2021).

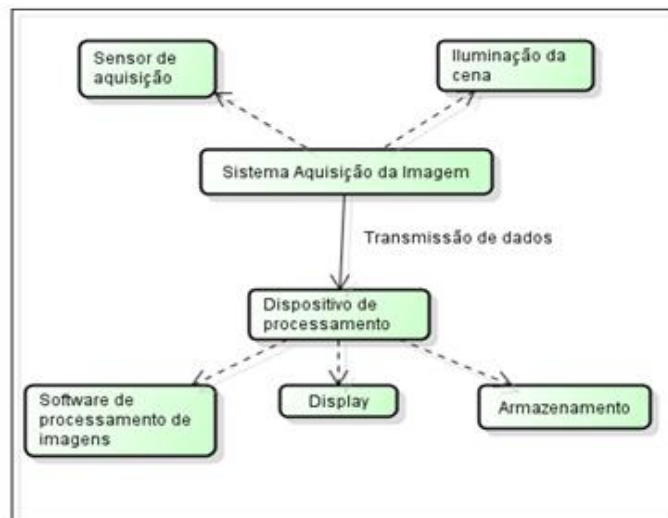
A visão computacional procura oferecer, de modo mais eficiente possível, uma vasta quantidade de informações ao sistema computacional. O reconhecimento de padrões está engajada no campo da visão computacional com atuações e perspectivas importantes para alcançar e realizar a máquina inteligente (SILVA, 2008)

No contexto de tecnologia da visão, é correto afirmar que visão computacional é uma técnica na qual tem-se como elemento de entrada uma imagem e após processamento de alto nível obtém-se como elemento de saída uma decisão inteligente, como por exemplo a classificação de padrões da imagem (FABRE, 2019).

3.4.1 Sistema de Visão Computacional

Um sistema de visão computacional necessita de diversos componentes que estão interligados e dependem um do outro pra funcionar. A figura 4, define uma estrutura geral dos componentes que envolvem um sistema de visão computacional (GALLON, 2013).

Figura 4 – Componentes de um sistema de visão computacional.



Fonte: Gallon (2013).

Os componentes e suas respectivas descrições são os seguintes:

- I. **Sensor de Aquisição:** A função do sistema de aquisição de imagens é obter informações da cena a ser monitorada, necessárias ao processamento e consecutiva inspeção. São utilizados diferentes equipamentos como sensores, câmeras, lentes e etc. (STIVANELLO, 2004);
- II. **Iluminação da cena:** A iluminação exerce um papel fundamental no sistema de captura, uma vez que uma câmera captura a luz refletida sobre a cena observada. Existem diversas técnicas de iluminação, que variam entre si na fonte de luz, intensidade, direção, etc. (STIVANELLO, 2004);
- III. **Sistema de aquisição da imagem:** Este sistema deve possuir placas de aquisição de imagens capazes de converter o sinal de vídeo proveniente das câmeras em imagens digitais (STIVANELLO, 2004);
- IV. **Dispositivo de Processamento:** Dever dispor de um hardware de alto desempenho para poder realizar o processamento das imagens digitais. Geralmente são utilizados computadores para realizar o processamento (GALLON, 2013);

- V. **Software de processamento de imagens digitais:** O software utilizado nos sistemas de visão é responsável pelo controle do sistema como um todo, pelo processamento e análise das imagens e pela interface com o usuário (STIVANELLO, 2004). Realiza a manipulação das imagens, reconhecimento e classificação de objetos, dentre outros processos (GALLON, 2013);
- VI. **Display:** Monitores ou outros dispositivos de saída de vídeo para exibição das informações geradas pelo software de processamento de imagens (GALLON, 2013);
- VII. **Armazenamento:** Utilizado para armazenar todas as informações coletadas com o software de processamento de imagens (GALLON 2013);

Para todo sistema de visão computacional são necessárias algumas etapas de processamento que variam de acordo com a aplicação (SILVA, 2008). Porém, basicamente todos os sistemas de visão computacional envolvem reconhecimento de objetos em imagens e transformações destes em informações que serão processadas e utilizadas por algum sistema especialista (DE MILANO e HORONATO, 2014).

3.4.1.1 Imagem Digital

Converter uma imagem para o formato digital significa transferir os elementos que a compõem para elementos representativos de cada pequeno fragmento original. O menor elemento da imagem, o *pixel*, é identificado segundo sua intensidade de nível de cinza e as cores correspondentes. Identificados, estes elementos são armazenados por códigos que podem ser reconhecidos pelo dispositivo de visualização e apresentados novamente por um dispositivo de visualização, como um monitor de vídeo ou impressora. Os códigos de cada *pixel* são armazenados em *bit*, que é definido como sendo a menor unidade de informação digital: a 1 *byte* equivalem a 8 *bits*. As imagens digitais são descritas pelo número de *bits* para representar a quantidade de cores possíveis para cada *pixel* (BALAN, 2009).

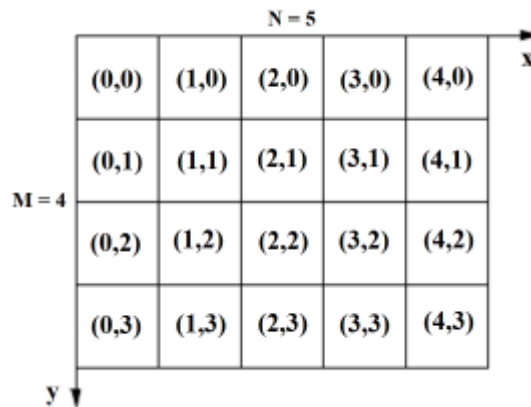
Uma imagem digital u com M linhas e N colunas pode ser compreendida como uma matriz (que pode ser multidimensional), em que cada entrada u_{ij} está associada à intensidade luminosa na posição (i,j) . Ou seja,

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{11} & \cdots & \mathbf{u}_{N1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{u}_{M1} & \cdots & \mathbf{u}_{MN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Cada elemento u_{ij} da imagem é chamado de pixel, abreviação de *picture element* (PERSERCHINO e DE ALBUQUERQUE, 2015).

A figura 5 exibe uma representação matricial de uma imagem digital.

Figura 5 – Representação matricial de uma imagem 4 x 5 pixels.



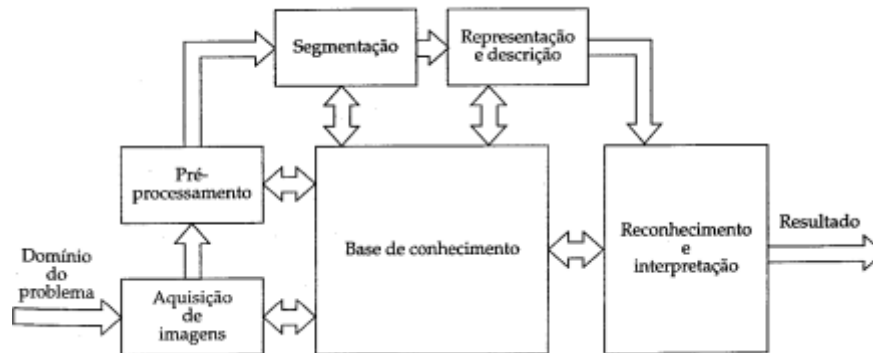
Fonte: Chui (2020).

É interessante notar a notação admitida para os eixos coordenados xy , onde o zero coincide com o canto superior esquerdo da imagem, o eixo x está na horizontal com sentido para a direita e o eixo y está na vertical com sentido para baixo. Essa conversão para a direção dos eixos na imagem é padrão na literatura de processamento de imagens (CHUI, 2020).

3.4.1.2 Processamento Digital de Imagens

O processamento de imagens assume um importante papel nos sistemas de visão computacional. A extração de informações de uma imagem, para posterior análise e tomada de decisão acerca de um produto é conseguida através do emprego de diversas técnicas de processamento de imagens (STIVANELLO, 2004). A figura 6, ilustra as etapas do processamento de imagem.

Figura 6 – Etapas do processamento digital de imagens.



Fonte: Gonzalez e Woods (2000).

- I. **Aquisição de imagem:** É o primeiro passo para um sistema de visão computacional. Trata-se do processo de aquisição de uma imagem ou de um conjunto de imagens a partir de sensores de câmeras, onde os pixels de cada imagem obtida indicam coordenadas de luz e propriedades físicas (DE MILANO e HORONATO, 2014);
- II. **Pré-processamento:** A etapa de pré-processamento deve ser realizada para melhorar a qualidade da imagem, pois visa reduzir o ruído ou defeitos inerentes ao processo de aquisição da imagem, tais como: melhoria da imagem, remapeamento de pixel, redução de ruído de pixel, correção geométrica, restauração, reconstrução, correção de contraste, brilho, iluminação, distorção e clareza. A função desta etapa é melhorar a imagem pra etapas subsequentes (BARCELOS, 2021);
- III. **Segmentação:** Esta fase consiste em segmentar a imagem, ou seja, subdividir uma imagem em suas partes ou objetos constituintes com objetivo de retirar da imagem somente o que será analisado. É considerada uma das tarefas mais difíceis de realizada no processamento de imagem (RIBEIRO; REBOUÇAS FILHO; CAVALCANTE, 2010);
- IV. **Representação e Descrição:** Nesta fase é realizada a transformação dos dados obtidos pela fase de segmentação, para que o computador possa processá-los de forma correta. Os dados podem ser representados de duas formas. A primeira é a representação por fronteiras utilizada quando o interesse se concentra nas características da forma externa, como: pontos ou cantos. A segunda é a representação por região, onde, o interesse se concentra na área interna das formas. A descrição extrai as características da imagem que resultem em informações quantitativas para discriminação entre as classes de objetos (GALLON, 2013);

- V. ***Reconhecimento e Interpretação:*** Reconhecimento é o processo que atribui um rótulo a um objeto, baseado na informação fornecida pelo seu descritor. A interpretação envolve a atribuição de significado a um conjunto de objetos reconhecidos (GONZALEZ e WOODS, 2000).

A base de conhecimento interage com todas as etapas durante o processamento de imagens. Segundo Gonzalez e Woods (2000) a base de conhecimento é o conhecimento prévio a respeito do domínio a ser estudado, dessa forma se torna mais simples a localização de informações nas imagens, pois limita a busca a ser conduzida. Além de guiar a operação de cada etapa, a base de conhecimento também cria interações entre as etapas de processamento.

3.4.2 Visão Computacional na Indústria

Os sistemas de visão de máquina estão cada vez mais presentes em aplicações industriais. São aplicadas desde simples técnicas de extração de características como cores, formas e contornos, até usos mais elaborados como filtros, operações de lógica, aritmética e transformadas. Todas levam a aplicações dos mais variados tipos, tais como: identificar objetos e movimentos, auxiliar sistemas de direção e segurança, e, ainda, inspecionar a qualidade na indústria (DE OLIVEIRA, 2015).

Nesse processo são utilizados *inputs* e *outputs* digitais para manipular dispositivos mecânicos em um processo industrial, em que é necessário executar uma ação baseada na análise da imagem feita por um sistema de visão computacional (DE ALMEIDA *et al.*, 2021).

No trabalho de Marques e *et al.* (1999) foi desenvolvido um sistema de medição de volume de objetos baseado em visão computacional para ser utilizado por empresas de transporte e armazenagem. O sistema consiste em uma câmera de vídeo, um espelho posicionado em ângulo definido para substituir o uso de uma segunda câmera e pastilhas de identificação. A imagem obtida pela câmera passa por um processo de extração de bordas, e a altura e área superior do objetos são encontradas, com o auxílio do espelho. Integrando-as o volume final do objeto é obtido, essa informação de volume de cada objeto é então armazenada em uma pastilha de identificação eletrônica. Esse sistema foi montado sobre uma esteira industrial e obteve erros médios no cálculo do volume perto dos 5%, porém, superior aos sistemas de medida de volumes convencionais usados por empresas de transporte e armazenamento.

Frick (2008) desenvolveu um sistema de visão computacional para classificação automática de minério de ferro por análise imagens de micrografia ótica. Utilizou um método supervisionado de reconhecimento de padrões para classificar os cristais de hematita em amostras de minério, e algumas características geométricas são obtidas como: área e área total, perímetro, ferret máximo e ferret mínimo e também características morfológicas foram obtidas após o processamento das imagens. Os cristais puderam ser classificados com base na sua porosidade, circularidade, razão de aspecto e razão de fibra.

Quinta (2009) desenvolveu um sistema de visão computacional para o controle microbiano em processos de produção de etanol. O objetivo do sistema foi automatizar a contagem de leveduras viáveis e não-viáveis em imagens microscópicas. Foram aplicadas técnicas de pré-processamento, segmentação de imagens, extração de atributos e reconhecimento de padrões. A classificação de leveduras não-viáveis apresentou bons resultados utilizando método de extração de atributos simples de cor, porém houve problemas na classificação de leveduras viáveis.

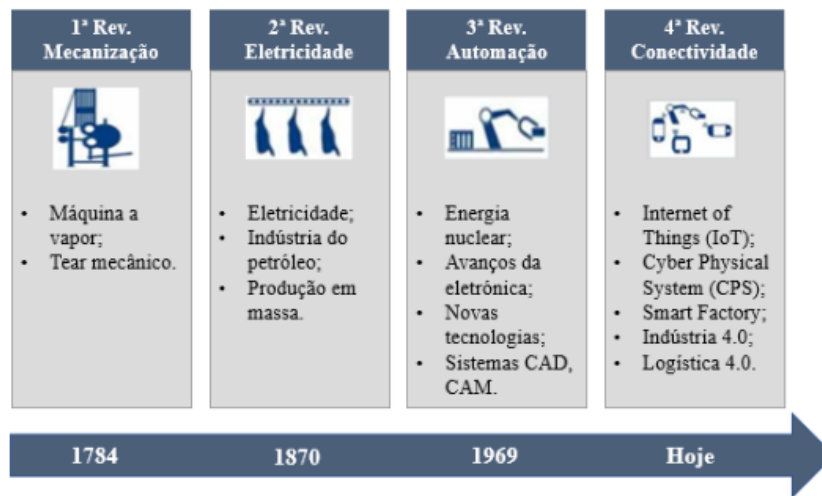
3.5 INDÚSTRIA 4.0

Em 2010 foi lançado na Alemanha o plano de desenvolvimento tecnológico *High-Tech Strategy 2020*, visando à fortificação da parceria entre indústria e ciência e a melhoria das condições para inovação tecnológica no país. Dentro do plano de ação dessa iniciativa, em março de 2012, a Indústria 4.0 foi adotada pelo governo federal como um projeto futuro. O objetivo estratégico é explorar o alto potencial econômico e de inovação resultante do impacto das tecnologias e comunicação na indústria (NETO *et al.*, 2018).

Sob a Indústria 4.0, o processo de produção consistirá em troca de informações, máquinas controladas e unidades de operação atuando de forma autônoma e inteligente. Segundo o plano de ações proposto pelo governo alemão, a fábrica inteligente é a característica mais importante da Indústria 4.0. Nela, os itens relevantes para a indústria, como materiais, sensores, máquinas, produtos, cadeia de suprimentos e clientes, podem ser conectados. Isso significa que estes objetos vão trocar informações e ações de controle uns com os outros de forma independente e emancipada (PARENTE, 2018).

Em outras palavras, a Indústria 4.0 representa uma evolução natural dos sistemas industriais anteriores, desde a mecanização do trabalho ocorrida no século XVIII até a automação da produção no dias atuais (SANTOS *et al.*, 2018). A figura 7 apresenta um resumo das revoluções industriais até o momento.

Figura 7 – Revoluções Industriais.



Fonte: Santos et al. (2018).

A Indústria 4.0 possibilita implementar tecnologias, como visão computacional, robótica avançada, inteligência artificial e Internet das Coisas (IIoT). Com o avanço dessas tecnologias, novas bibliotecas, frameworks, softwares e equipamentos passaram a ser desenvolvidos para diversos setores.

Nesta conjuntura observa-se a possibilidade de integrar as ferramentas da Indústria 4.0 aos processos convencionais, como por exemplo, o processo de levitação pneumática, possibilitando a modernização, melhorias e ganhos. Portanto, neste trabalho foi implementado a integração de visão computacional e internet das coisas (IoT), visando o controle e monitoramento de uma bancada de levitação pneumática. A seguir as tecnologias propostas serão apresentadas com mais detalhes.

3.5.1 Internet das Coisas

A Internet das Coisas é um novo paradigma tecnológico que representa a nova onda de inovação tecnológicas com aplicações quase ilimitadas. É um conceito que emerge da visão de um mundo onde todas as coisas estarão conectadas em todos os lugares de todas as maneiras e sob qualquer condição (FILHO *et al.*, 2021).

A Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things -IoT*) emergiu dos avanços de várias áreas como sistemas embarcados, microeletrônica, comunicação e sensoriamento. De fato, a IoT tem recebido bastante atenção tanto da academia quanto da indústria, devido ao seu potencial de uso nas mais diversas áreas das atividades humanas (SANTOS *et al.*, 2016).

Basicamente, é a expansão da fronteira da internet, para além dos computadores, *tablets* e celulares, quaisquer objetos ou “coisas” do dia a dia, podem interagir entre si, por meio de protocolos de comunicação, gerando e compartilhando dados. Estas novas habilidades, do objetos comuns, geram um grande número de oportunidades tanto no âmbito acadêmico quanto no industrial.

A conceito básico da internet industrial das coisas (IoT), para processos de manufatura, é a presença generalizada de sensores, códigos, celulares, entre outros. Por meio do endereçamento exclusivo as “coisas” possuem capacidade de interagir e cooperar dentro de uma rede para atingir objetivos em comum. Ao conectar objetos com diferentes recursos a uma rede, potencializa-se o surgimento de novas aplicações (SIQUEIRA, 2018).

Em vista disso, esse trabalho utiliza as aplicações da internet das coisas integrada a visão computacional, para desenvolver um sistema que visa o monitorar e avaliar uma bancada experimental de levitação pneumática.

3.5.1.1 Arquitetura para IoT

Para conectar bilhões de objetos inteligentes à Internet, deve-se ter uma arquitetura flexível. Na literatura, tem-se variedade de propostas de arquiteturas sofisticadas, que se baseiam nas necessidades da academia e da indústria (SANTOS *et al.*, 2016).

Segundo Filho (2016) de acordo com o Instituto IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) a atual arquitetura para a IoT é constituída de três níveis, Aplicações, Rede/Comunicação de Dados e Sensoriamento, conforme ilustrado na figura 8.

Figura 8 – Arquitetura da IoT conforme a IEEE.

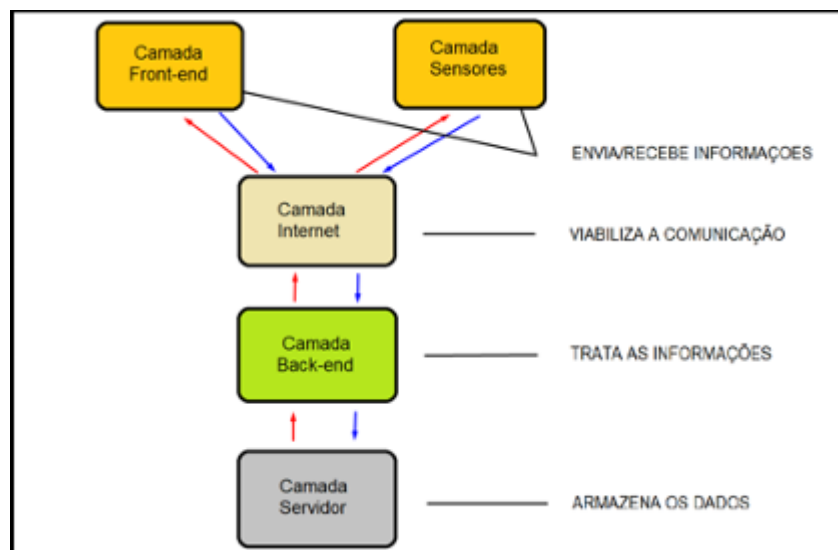


Um dos pontos fundamentais da IoT é a parte de sensoriamento. Os sensores estão nas raízes do conceito de Internet das Coisas. São dispositivos importantes para coletar informações em campo, em ambientes inacessíveis, em sistemas produtivos, na área médica, na análise de distúrbios, na criação de animais e outros inimagináveis processos. Aos sensores muitas vezes se acoplam atuadores, de tal forma que em processos especiais pode-se não só coletar dados como também atuar sobre o ambiente, como, por exemplo, um sensor de luminosidade que também é capaz de acionar uma lâmpada (FILHO, 2016).

A camada de rede (*network layer*) é responsável por transmitir e processar as informações, sendo considerada o centro de processamento inteligente da arquitetura. Suas funcionalidades podem ser estendidas para a convergência de redes de comunicação e a Internet, como centro de gerenciamento da rede e centro de informação (SÔNEGO, 2017). Logo acima, encontra-se a camada de aplicação, a qual é responsável por prover serviços para os clientes. Por exemplo, uma aplicação solicita medições de temperatura e umidade para clientes que requisitam estas informações (SANTOS *et al.*, 2016).

No entanto, cada aplicação de IoT pode ter uma arquitetura diferente, a configuração vai depender das necessidades do usuário. Por exemplo, Szulha e Szulha (2018) desenvolveram uma arquitetura IoT para controle de vazamentos em tubulações de água, cujo esquema da arquitetura é mostrado na figura 9.

Figura 9 – Arquitetura proposta.



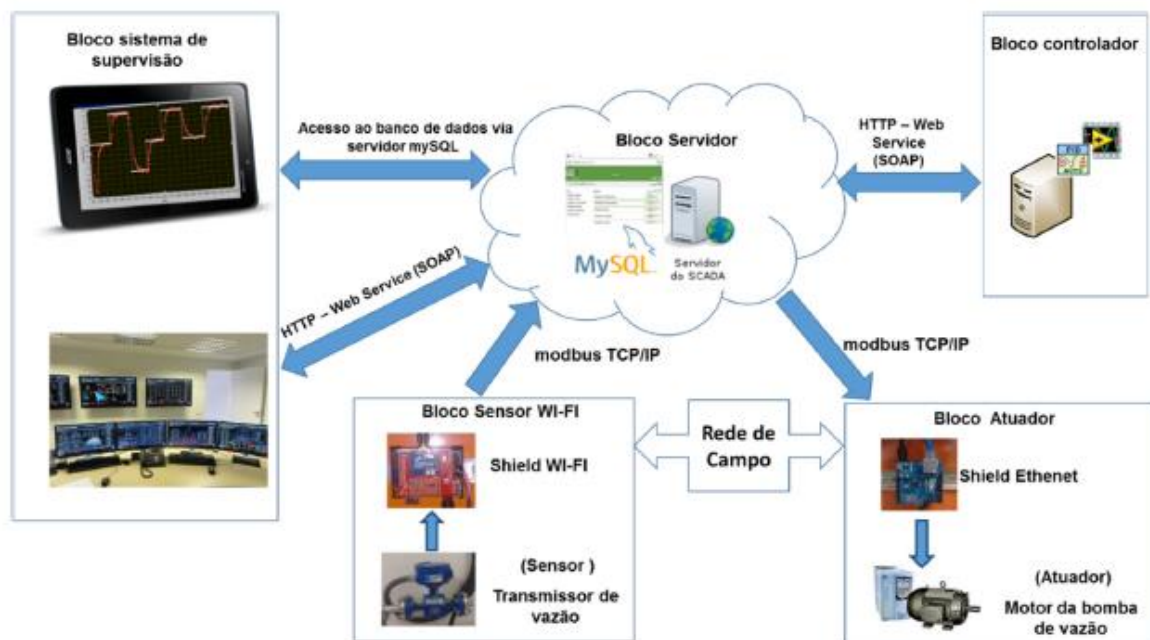
Fonte: Szulha e Szulha (2018).

A arquitetura proposta no trabalho apresenta cinco camadas. A camada de sensores é responsável pela captação dos sinais externos do ambiente, enviando informações para as outras

camadas. No *front-end* é onde ocorrerá a interação com o usuário, apresentando uma interface gráfica com informações referentes aos dados dos sensores e armazenados na camada de servidor. A camada de *back end* é responsável por receber todas as requisições vindas das camadas de sensores e *front-end*. O bloco de servidores é responsável por armazenar todas as informações recebidas pela camada de *back end*. Por fim, a camada de internet é responsável por realizar a comunicação entre todas as camadas da arquitetura, tornando o projeto escalável.

Bigheti *et al.* (2016) apresentaram uma arquitetura de automação e controle de processos em nuvem baseado na aplicação de WNCS integrado a um servidor Web. A proposta foi aplicada em uma planta de escala piloto para o controle de vazão. A arquitetura apresenta cinco camadas: Sensor, Atuador, Controlador, Servidor e Supervisão. O bloco Servidor é responsável pelo armazenamento de dados de controle num banco de dados MySQL na nuvem, o bloco Controlador é responsável pelo controle do processo, através do acesso às variáveis de controle utilizando um serviço web. O bloco Sensor é composto por um medidor de vazão magnético que faz a aquisição da variável de processo (PV) e esse sinal é convertido em sinal de *wifi* que se comunica com o bloco Servidor. O bloco Atuador recebe o sinal da variável manipulada (MV) e envia a um inversor de frequência que comanda uma moto-bomba para variação da vazão. A figura 10 representa a arquitetura proposta.

Figura 10 - Arquitetura proposta pra Automação e Controle em nuvem.



Fonte: Bigheti *et al.* (2016).

3.5.1.2 Cloud Computing

Através da Internet das Coisas (IoT), uma imensa quantidade de dispositivos são conectados à internet, gerando uma grande quantidade de dados. Computação em nuvem é uma tecnologia adotada atualmente para processar, armazenar e prover controle de acesso a dados (PACHECO, 2018). Logo, torna-se imprescindível o uso de computação em nuvem (*Cloud Computing*) em aplicações de IoT.

Para aplicações de Internet das Coisas, o conceito de nuvem se tornou um complemento importante. Os dispositivos IoT normalmente têm poder de processamento limitado, baixa confiabilidade e alta taxa de erros. Aplicações críticas não devem ficar hospedadas em dispositivos IoT. Esses dispositivos devem enviar suas informações para um elemento centralizador, com maior poder de processamento e disponibilidade. Se esse elemento estiver na nuvem, as aplicações ganham mais flexibilidade e escalabilidade. Além disso, evitam a necessidade de um servidor local de alta disponibilidade (FONSECA, 2018)

Computação em nuvem pretende ser global e prover serviços para as massas que vão desde o usuário final que hospeda seus documentos pessoais na Internet até empresas que terceirizam toda infraestrutura de TI para outras empresas. Nunca uma abordagem para utilização real foi tão global e completa: não apenas recursos de computação e armazenamento são entregues sob demanda, mas toda a pilha de computação pode ser aproveitada na nuvem. A Figura 11 mostra uma visão geral de uma nuvem computacional (SOUSA, 2009).

Figura 11 – Visão geral de uma nuvem computacional.



Fonte: Souza (2009).

Dentre os serviços ofertados pela computação em nuvem, o armazenamento de dados se destaca. O armazenamento da computação em nuvem permite que os usuários finais possam guardar seus dados com um prestador de serviço da nuvem ao invés de um sistema local. Assim como acontece com outros serviços de nuvem, é possível acessar os dados armazenados através da conexão com a Internet (ANDRADE *et al.*, 2015).

Os dados, a partir desse modelo, são armazenados em múltiplos servidores em vez de servidores dedicados, tipicamente empregues em rede tradicionais de armazenamento de dados. A localização dos ficheiros pode mudar a qualquer momento, visto que o sistema gere dinamicamente o espaço disponível nos vários servidores e equilibra o armazenamento, utilizando algoritmos de otimização. Contudo, apesar desta localização variável, o utilizador vê os ficheiros numa localização “estática”, sendo-lhe permitida a gestão dos seus dados como se estivesse utilizando o seu próprio computador (BARBOSA, 2013).

Uma aplicação típica de IoT é funcionar como datalog, cujo objetivo é apenas registar uma grandeza obtida por um sensor. Esse registro pode ser usado com vários objetivos, desde monitoramento ambiental e aplicações industriais. Também é possível disparar alarmes ou ações baseadas nos valores registrados. Datalog já foi um processo manual, mas passou a ser automatizado com armazenamento local, depois por um servidor em rede. O momento atual é de enviar o registro para a nuvem, que economiza toda a infraestrutura necessária para o registro local e, de quebra, facilita o acesso remoto. Diversos serviços de registro de informações IoT estão disponíveis; alguns de forma gratuita. Eles oferecem interface elaboradas, incluindo gráficos e aplicativos para acesso em smartphone (DE OLIVEIRA, 2017).

Uma das plataformas muito utilizada nos projetos de internet das coisas é a *ThingSpeak*. Com ela é possível receber dados de sensores, analisar esses dados, plotar gráficos para melhorar a visualização, criar reações interligadas aos dados recebidos, e enviar *tweeters* que possibilitam a interação com outras plataformas e ações via protocolo HTTP. As interfaces desta plataforma deixam as aplicações mais intuitivas para análise do usuário (DE OLIVEIRA, 2017).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

O trabalho foi desenvolvido em uma bancada experimental de um levitador pneumático. A bancada experimental é composta por tubo de vidro transparente de formato cônico, um sistema motor-ventilador, um inversor de frequência, uma câmera digital com suporte tripé, um notebook com software de processamento e uma placa de aquisição de dados.

4.2 LOCAL DA PESQUISA

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação e Automação de Processos – LIAP, anexo do Laboratório de Pesquisa e Ensino de Engenharia Química – LEPEQ, situado na Universidade Federal do Maranhão – UFMA, em São Luís do Maranhão.

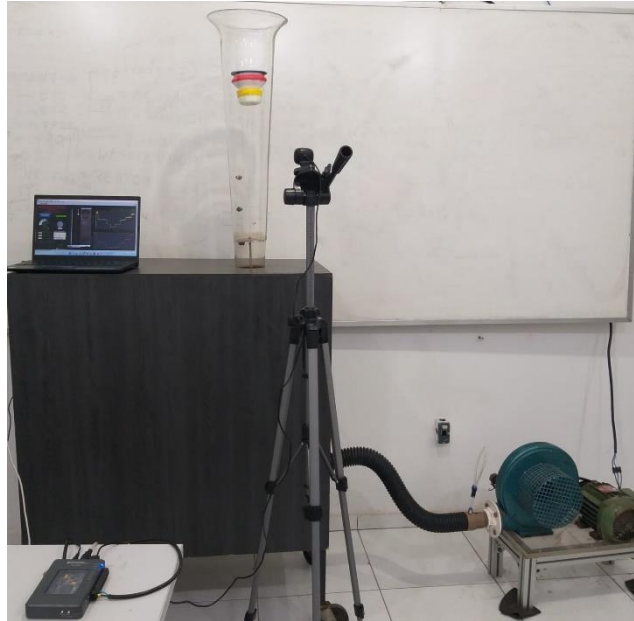
4.3 INSTRUMENTOS/EQUIPAMENTOS/SOFTWARES UTILIZADOS

4.3.1 Bancada Experimental

A montagem da bancada teve como objetivo desenvolver um protótipo de um levitador pneumático com monitoramento e controle em tempo real da posição do objeto utilizando visão computacional, estratégia de controle PID e compartilhamento de dados na nuvem.

Do ponto de vista operacional, o processo opera em regime contínuo, no qual o fluido, no caso o ar, é injetado constantemente no levitador pneumático, mantendo o objeto na altura desejada. Para a medição da posição do corpo dentro do levitador foi utilizado uma câmera digital. Para o controle de ar no sistema, foi empregado um inversor de frequência para controlar a velocidade do motor trifásico acoplado ao ventilador. A foto da unidade pode ser visualizada na figura 12.

Figura 12 – Bancada Experimental.



Fonte: Próprio Autor (2022).

A bancada experimental é dotada de um sistema motor-ventilador. O ventilador centrifugo tem acoplado em seu eixo um motor de indução trifásica, da fabricante WEG S. A., modelo 80 1084, frequência de 60Hz, rotação de 3480 rpm e potência de 1,5 CV. Esse sistema é responsável pelo fluxo de ar que movimenta o objeto verticalmente. O sistema motor-ventilador apresenta configurações industriais, aproximando a bancada a uma aplicação semelhante aos processos reais. No sistema existe uma tubulação que conecta a saída do ventilador à base do sistema de levitação. O sistema motor-ventilador é ilustrado na figura 13.

Figura 13 – Sistema motor-ventilador.



Fonte: Próprio Autor (2022).

O acionamento e controle do motor é realizado com o auxílio de um inversor de

frequência, fabricante SIEMENS, modelo SINAMICS G110, frequência de 60Hz. É o melhor método de partida de motores elétricos por indução, pois mantém a corrente constantes e equivalente à corrente nominal do motor (PEREIRA, 2014). O inversor é exibido na figura 14.

O principal objetivo dos inversores de frequência não é simplesmente partir motores elétricos, mas, controlar sua velocidade durante os diversos processos industriais. Os inversores de frequência são utilizados nas indústrias químicas e petroquímicas, cimento, têxtil, siderúrgicas etc., onde, se necessita de um amplo controle de velocidade dos motores em função dos processos de manufatura (DE OLIVEIRA SOUZA, 2017)

Figura 14 – Inversor de frequência.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Para que de fato o inversor de frequência possa controlar o motor, é necessário que seus parâmetros de funcionamento sejam adequados a determinada aplicação. Portanto, foi realizado a parametrização do inversor conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Parametrização do inversor de frequência.

Parâmetro	Função	Configuração
P0003	Nível de acesso do usuário	2 (nível de acesso estendido)
P0010	Parâmetros de inicialização	1 (inicialização rápida)
P0100	Seleção de 50/60 Hz	2 (América do Norte [KW], 60 Hz)

P0304				Nota: A entrada de dados na placa de identificação deve corresponder à fiação do motor (estrela ou delta).
Para V20 P0304 [OK]	Tensão nominal do motor [V]			
em ln 000 [OK]				220
P0305				
Para V20 P0305 [OK] em ln 000 [OK]	Corrente nominal do motor [A]			5,2
P307				
Para V20 P0307 [OK] em ln 000 [OK]	Potência nominal do motor [KW]			1,1
P0308				
Para V20 P0308 [OK] em ln 000 [OK]	Fator de potência nominal do motor (cosφ)			0,54
P0310				
Para V20 P0310 [OK] em ln 000 [OK]	Frequência nominal do motor [Hz]			60
P0311				
Para V20 P0311 [OK] em ln 000 [OK]	Velocidade nominal do motor [RPM]			3480
P0700				
Para V20 P0700 [OK] em ln 000 [OK]	Selecionando a fonte do sinal de controle			2 (Terminais)
P1000				
	Seleção de ponto de ajuste de frequência			2 (ponto de ajuste analógico)
P1080				
Para V20 P1080 [OK] em ln 000 [OK]	Frequência mínima do motor [Hz]			5
P1082				
Para V20 P1082 [OK] em ln 000 [OK]	Frequência máxima do motor [Hz]			60
P1120				
	Tempo de aceleração [s]			10

Para V20 P1120

[OK] em ln 000 [OK]

P1121

Para V20 P1121

[OK] em ln 000 [OK]

Tempo de desaceleração [s]

10

P0010

Parâmetro de inicialização

0 (pronto)

P1032

Inibição da reversão de MOP

0 (habilitado)

Fonte: Próprio Autor (2022)

Para o controle da posição do corpo dentro do levitador pneumático foi utilizando uma câmera digital LifeCam HD-300, fabricante Microsoft, resolução de 640 x 480 pixels, figura 15. A câmera foi posicionada a frente da bancada experimental com auxílio de um suporte tripé, e as imagens são enviadas para o software realizar o processamento digital das imagens.

Figura 15 – Câmera digital LifeCam HD-300



Fonte: Microsoft (2022).

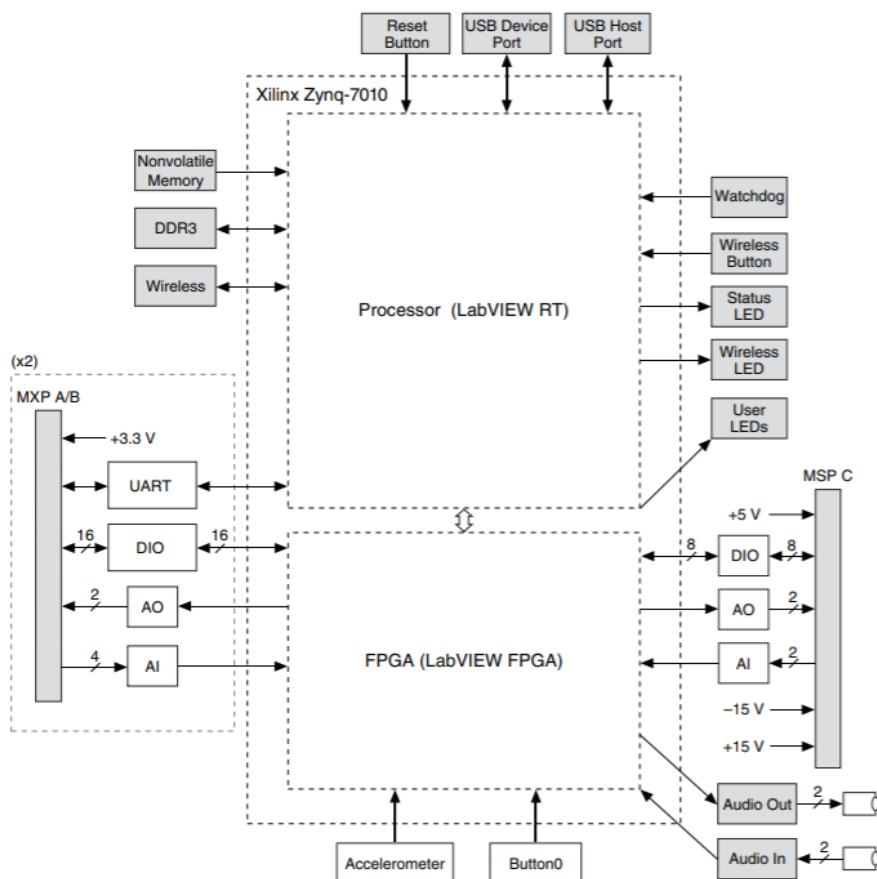
4.3.2 Sistema de Aquisição de Dados

A aquisição de dados foi realizada utilizando o *hardware* da *National Instruments*, um sistema embarcado, NI myRIO – 1900. Consistindo de um dispositivo portátil reconfigurável, com integração ao LabVIEW®, software de engenharia de sistemas criado especificamente para aplicações de teste, medição e controle, com rápido acesso ao hardware e às informações obtidas a partir dos dados. (SILVA, 2019)

A placa de aquisição é dotada de um processador de tempo *real* ARM® Cortex A9 dual core 667MHZ/512MB, um módulo FPGA integrado Xilinx Zynq 7 Series com um Clock onboard

de 40 a 76MHz, 10 entradas analógicas operando a 500KS/s, 06 saídas analógicas operando a 345KS/s e 40 linhas de entrada e saída digital operando a 50MS/s. (FIDELIS, 2018). A figura 16 exhibe a configuração interna da placa.

Figura 16 – Configuração interna da NI myRIO -1900.



Fonte: Fidelis (2018).

A placa foi responsável por emitir e receber sinais de/para o processo. A NI myRIO - 1900 recebe as imagens do objeto no levitador, por meio da câmera, conectada na entrada USB Device Port da placa, e envia os dados para o software LabVIEW® via entrada USB Host Port, para realizar o processamento digital de imagens e os cálculos de controle. O sinal de saída digital é convertido para analógico e enviado para inversor de frequência, que controla a velocidade do motor trifásico para o ajuste de fluxo de ar. O inversor frequência é conectado na porta C na saída analógica da placa, AI0 e ao terra da placa, AGND. A figura 17 exhibe a conexão realizada.

Figura 17 – Entradas usadas na placa NI myRIO -1900.



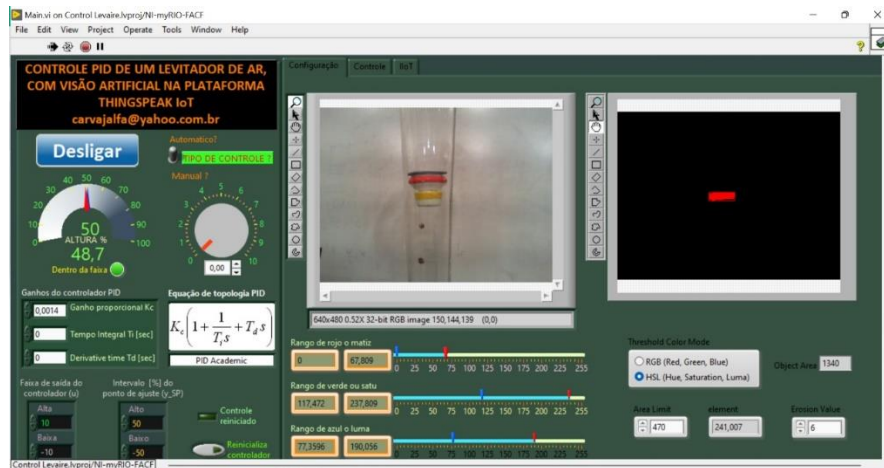
Fonte: Próprio Autor (2022)

4.3.2 Software LabVIEW®

Para o processamento digital de imagens e controlar a bancada, foi desenvolvido um programa em linguagem G no software LabVIEW® que também serve com interface homem-máquina, cuja tela principal é mostrada na figura 18.

O National Instruments LabVIEW® 2019 permite, através do dispositivo myRIO, a análise e interpretação virtual através da construção de instrumentos virtuais tais como indicadores gráficos analógicos e/ou digitais. Possibilita também a criação de interfaces amigáveis muito semelhantes a painéis de máquinas, podendo ser utilizado como uma interface home-máquina. Desta forma, por ser muito similar aos instrumentos reais, os programas em LabVIEW® são chamados de Virtual Instruments (VI's) (DE LIMA, 2021).

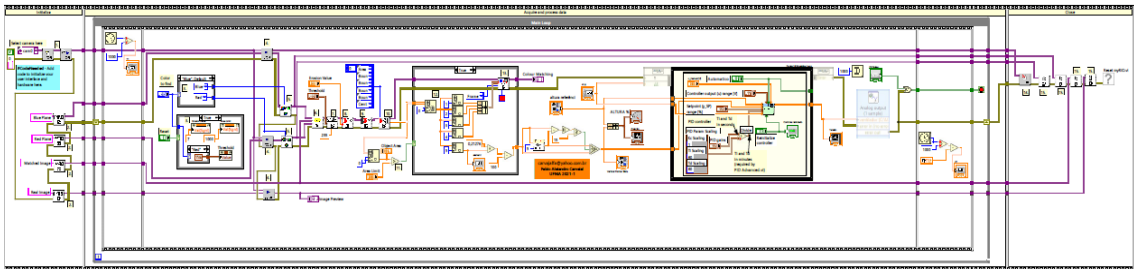
Figura 18 – Interface home-máquina no LabVIEW.



Fonte: Próprio Autor (2022)

O software realiza a comunicação com o processo através da placa de aquisição de dados NI myRIO – 1900, que ao receber os dados processa-os em estrutura de blocos, com cada bloco possuindo uma função. A figura 19 mostra a programação realizada no LabVIEW® para aquisição dos dados de processo, processamento digital da imagem e elaboração do controle PID.

Figura 19 – Código fonte no LabVIEW.



Fonte: Próprio Autor (2022)

O programa do sistema supervisor faz a aquisição de dados em tempo real da posição do corpo flutuante. A imagem da câmera passa por um tratamento para que a cor escolhida seja localizada, e por sua vez a posição do objeto seja definida dentro do levitador. A partir da comparação entre a altura do corpo e o valor de referência desejado (*setpoint*), é calculado o erro de controle ($e(t)$), que entra no bloco do controlador PID para que o sinal de controle seja calculado, por fim, o sinal de controle é somado à voltagem atual do inversor de frequência, para que este atue sobre a velocidade do motor, alterando o fluxo de ar para o levitador, controlando a altura do objeto.

4.3.2 ThingSpeak

O armazenamento e monitoramento dos dados foi feito utilizando a plataforma *ThingSpeak*, possibilitando que os dados processados no LabVIEW® fossem armazenados na nuvem e apresentados em gráficos.

O *ThingSpeak* é uma plataforma de análise IoT que permite agregar, visualizar e analisar fluxos de dados ao vivo na nuvem. Nessa plataforma, os dados são enviados através do método GET de requisições HTTP, processados e armazenados em um banco de dados (GUEDES, 2018).

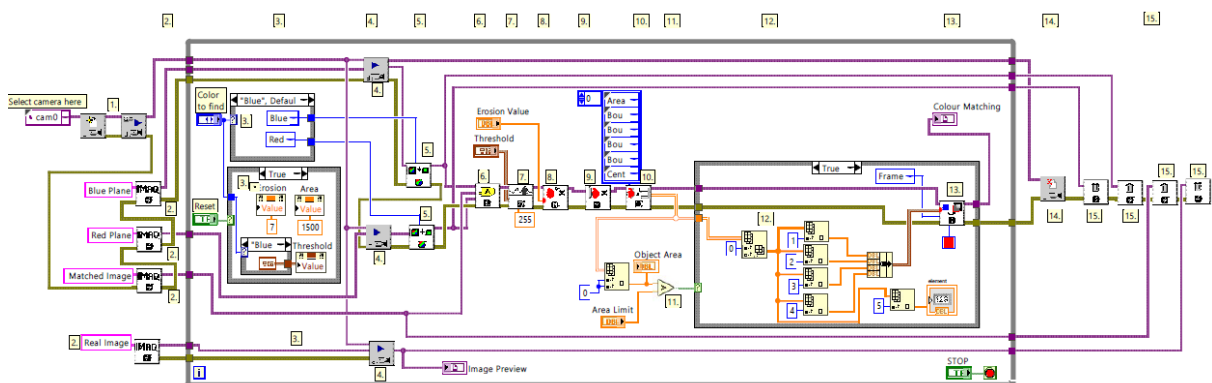
4.4 ANÁLISES, MÉTODOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.4.1 Processamento Digital de imagens

Para o controle da altura do objeto utilizou-se uma câmera digital como sensor, desta forma foi necessário utilizar técnicas que identifique a altura do objeto a partir da captura de imagens digitais.

Foi desenvolvido no software LabVIEW® um bloco seguindo a etapas do processamento digital descrito na seção 3.4.1.2. A figura 20 exhibe o código no software.

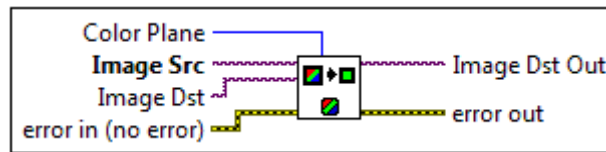
Figura 20 – Processamento Digital de Imagem no LabVIEW®.



Fonte: Próprio Autor (2022)

A primeira etapa do código realiza o reconhecimento da câmera digital e inicialização da captura das imagens. A etapa seguinte separou a imagem em 2 planos individuais RGB, através do bloco IMAQ ExtractSingleColorPlane VI (figura 21).

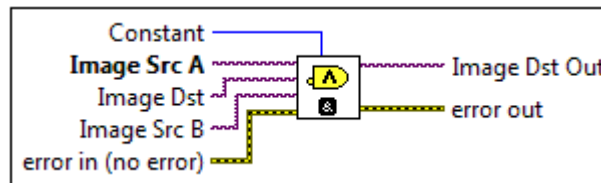
Figura 21 – Bloco ExtractSingleColorPlane VI.



Fonte: NI Vision for LabVIEW Help (2019)

Com este bloco, foram gerados 2 imagens baseadas nas cores a serem identificadas no objeto, plano azul ou vermelho. As duas imagens geradas foram comparadas, para isso utilizou-se o bloco IMAQ LogDiff VI (figura 22), que compara os dois planos e mantém os bits encontrados em um dos planos de referência que estão ausentes no outro. Logo, a imagem de saída conterá somente os bits do plano da cor escolhida, dessa forma encontra-se o plano vermelho ou azul de uma forma mais robusta.

Figura 22 – Bloco IMAQ LogDiff VI.



Fonte: NI Vision for LabVIEW Help (2019)

Em seguida realizou-se a segmentação da imagem, que conforme já discutido na seção 3.4.1.2, permite a separação de objetos de uma imagem onde se consegue trabalhar com partes de interesse. Para realizar esta classificação, utilizou-se a limiarização, um dos algoritmos de segmentação mais intuitivos e rápidos empregados em processamento de imagens (FREITAS, 2007).

Matematicamente, a operação de limiarização pode ser descrita como uma técnica de processamento de imagens na qual uma imagem de entrada $f(x,y)$ de N níveis de cinza produz à saída uma imagem $g(x,y)$, chamada de imagem limiarizada, cujo número de níveis de cinza é menor que N . Normalmente, $g(x,y)$ apresenta 2 (dois) níveis de cinza, sendo

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x,y) \geq T \\ 0, & \text{se } f(x,y) < T \end{cases} \quad (5)$$

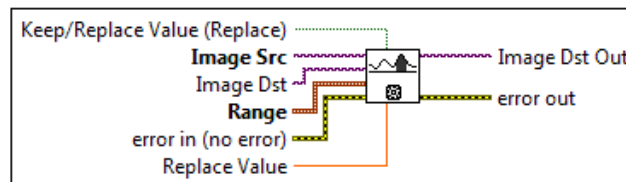
onde os pixels rotulados com 1 correspondem aos objetos e os pixels rotulados com 0 correspondem ao fundo e T é um valor de tom de cinza predefinido denominado limiar. Neste caso tem-se a limiarização simples (NEVES, 2001).

Caso se tenha dois limiares tem-se a limiarização múltipla, que admite dois limiares T_1 e T_2 , e é definida por: (NEVES, 2001)

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } T_1 \leq f(x, y) \leq T_2 \\ 0, & \text{nos demais} \end{cases} \quad (6)$$

Para realizar a limiarização da imagem foi utilizado o bloco IMAQ Threshold VI (figura 23), que recebe a imagem no plano da cor escolhida a partir de definição do limiares, inferior e superior, identifica a cor escolhida, gerando uma imagem binarizada, onde os bits do objeto identificado estão com valor 1, que representa a cor branca e os bits do fundo estão com o valor 0 na cor preta. Neste trabalho os limiares foram escolhidos manualmente durante a execução do software.

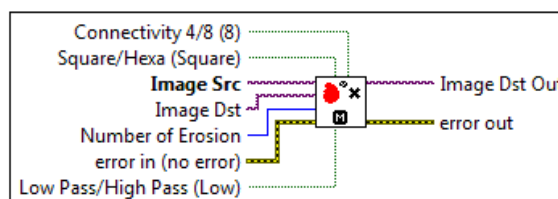
Figura 23 – Bloco IMAQ Threshold VI.



Fonte: NI Vision for LabVIEW Help (2019)

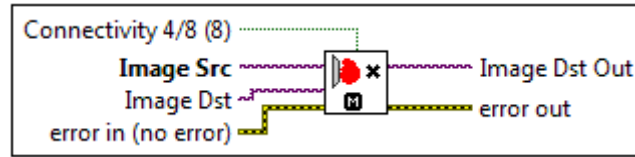
Em seguida filtros foram aplicados para melhorar o processamento da imagem. Para diminuição de ruídos que possam prejudicar a análise da imagem, utilizou-se o bloco IMAQ RemoveParticle VI (figura 24). Para eliminar possíveis partículas indesejadas que cruzam a borda da imagem usou-se o bloco IMAQ RejectBorder VI (figura 25)

Figura 24 – Bloco IMAQ RemoveParticle VI.



Fonte: NI Vision for LabVIEW Help (2019)

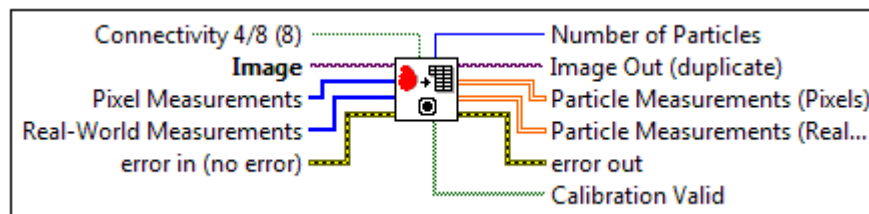
Figura 25 – Bloco IMAQ RejectBorder VI.



Fonte: NI Vision for LabVIEW Help (2019)

Após a limiarização e filtragem, o objeto de interesse está totalmente segmentado da imagem, dessa forma, foi possível extrair informações a respeito do objeto. O bloco IMAQ Particle Analysis VI (figura 26) retorna o número de objetos detectados numa imagem binária e uma matriz de duas dimensões de medições sobre o objeto, como por exemplo, área, bordas e centro de massa em pixels.

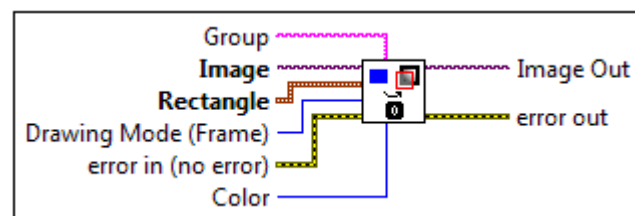
Figura 26 – Bloco IMAQ Particle Analysis VI.



Fonte: NI Vision for LabVIEW Help (2019)

Com o objeto identificado e informações da sua área e bordas extraídas, foi realizado um contorno em volta do mesmo pra melhorar sua identificação na imagem de saída. O bloco IMAQ Overlay Rectangle VI (Figura 27) sobrepõe um retângulo sobre a imagem.

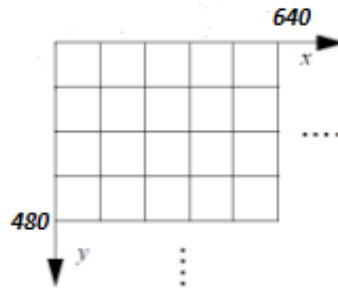
Figura 27 – Bloco IMQ Overlay Rectangle VI.



Fonte: NI Vision for LabVIEW Help (2019)

A informação do centro de massa foi utilizada para determinar a posição do objeto no levitador pneumático. A resolução da câmera é de 640 x 480 pixels, ou seja, a imagem possui 640 pixels na horizontal e 480 pixels na vertical como ilustrado na figura 28.

Figura 28 – Imagem digital de resolução 640 x 480 pixel



Fonte: Próprio Autor (2022)

Com o objetivo de a posição vertical do objeto, ou seja, a altura, considera-se apenas como referência a coordenada y , logo, a altura do objeto estará entre 0 - 480 pixels. Dessa forma, a altura em porcentagem, pode ser determinar por uma simples regra de três. Como pode ser visto na figura 27, os pixels máximos na vertical, ou altura máxima, tem como referência a base da imagem, para inverter o valor máximo de pixel para o topo da imagem, o 100% é subtraído pela altura encontrada, resultando na equação (7).

$$\text{Altura (\%)} = 100 - \text{centro de massa} \times 0,208 \quad (7)$$

A altura calculada será utilizada no bloco do controlador PID para o determinar a saída de controle com base na altura de referência (*setpoint*). A seguir as etapas de controle serão detalhadas.

4.4.2 Técnica de Controle de Processo

Para o controle da bancada experimental optou-se por utilizar o método clássico de controle, o controlador PID (Proporcional Integral Derivativo). Este controle é um dos mais utilizados em ambientes industriais por possuir uma simplicidade relativa em ser implantado com um desempenho satisfatório a uma vasta gama de processos. O controlador PID consiste na soma de três ações de controle, a ação proporcional, a ação integral e a ação derivativa (DE SOUZA, 2021).

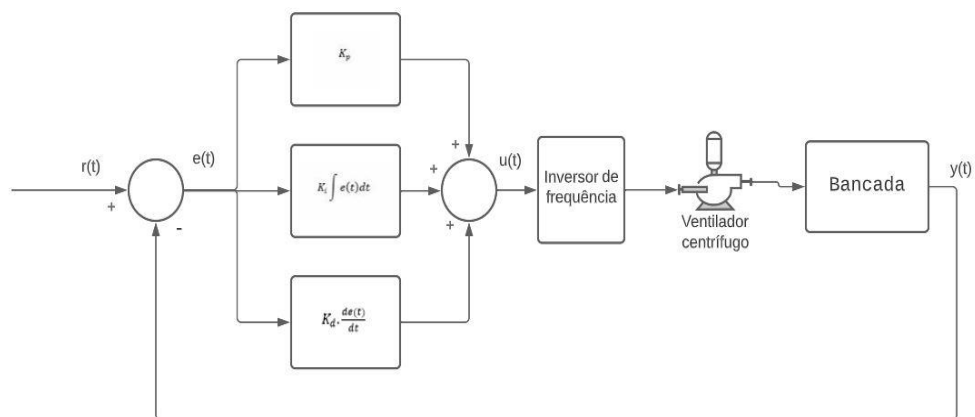
Um controlador PID calcula inicialmente o “erro” entre a sua variável controlada (medida no processo) e o seu valor desejado (“setpoint”), e em função deste “erro” gera um sinal de controle, de forma a eliminar este desvio. O algoritmo PID usa o erro em três módulos distintos para produzir a sua saída ou variável manipulada: o termo proporcional (P), o integral (I) e o derivativo (D) (TEIXEIRA, 2010).

Combinando as três ações, o cálculo do controlador PID é realizado através da equação (8).

$$u(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t) dt + t_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (8)$$

Neste projeto foi realizado a avaliação da melhor configuração (P, PI, PID) para o controle da altura do objeto dentro do levitador pneumático. O controlador recebe o *setpoint* pré-definido e altura em tempo real do objeto. A diferença dessas variáveis, o erro (e), é então adicionado à equação (8) para o cálculo do sinal de controle. Foi realizado a sintonia do controlador para determinar os melhores valores para os parâmetros (K_c , t_i , t_d). O sinal de controle então é enviado para o inversor de frequência que atua sobre o sistema motor-ventilador, regulando o fluxo de ar para ajustar a altura do objeto no levitador. A figura 29 ilustra a malha de controle.

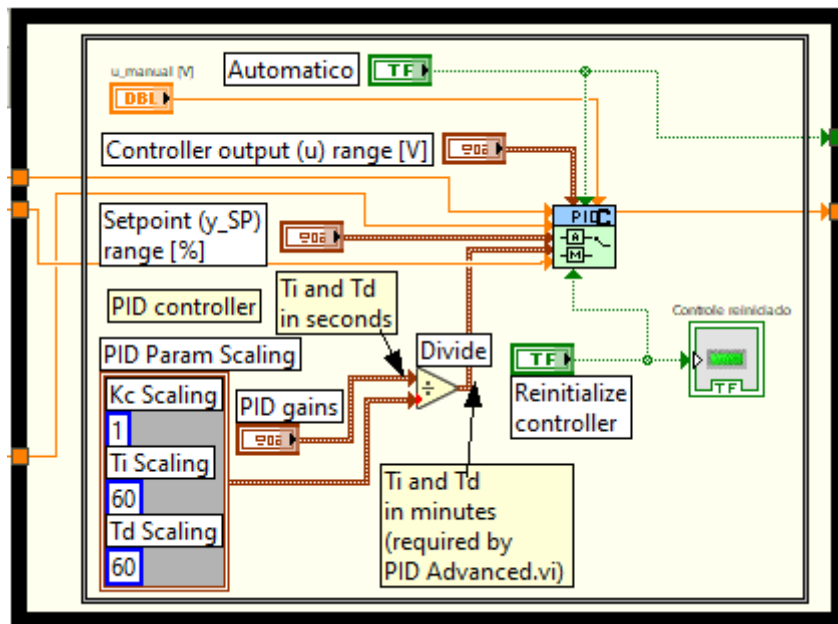
Figura 29 – Malha de controle da Bancada Experimental.



Fonte: Próprio Autor (2022)

A figura 30 exibe o código do controlador PID no LabVIEW

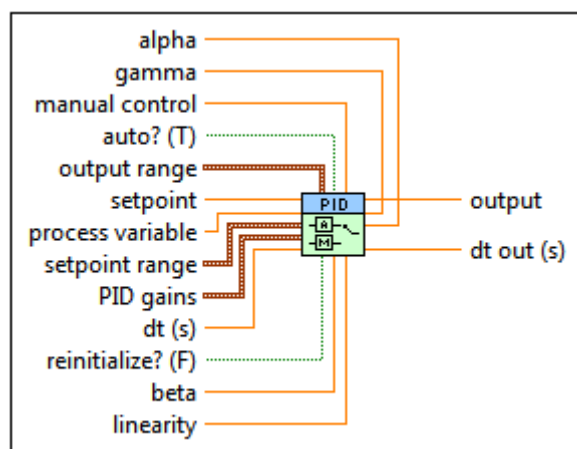
Figura 30 – Controlador PID no LabVIEW.



Fonte: Próprio Autor (2022)

O bloco utilizado para o controlador foi o PID Advanced VI (figura 31). Esse bloco possui entradas para a referência (*setpoint*), variável de processos (*process variable*), ganhos do PID (*PID gains*), faixa de variação da variável manipulada (*output range*), comando para reinicialização (*reinitializa? (F)*), faixa da variável de referência (*setpoint range*), linearidade (*linearity*) e bloco também permite o controle em modo manual com transições de manual para automático sem interrupções.

Figura 31 – PID Advanced VI



Fonte: LabVIEW Help (2011)

O bloco utiliza os ganhos integrativo e derivativo, t_i e t_d , respectivamente, em minutos, dessa forma foi necessário a conversão de segundos para minutos, antes que os parâmetros entrem no bloco PID. O sinal de saída do controlador é adaptado para um valor proporcional de -10 a 10 V e enviado ao inversor de frequência que controla a velocidade do motor.

4.4.3 Técnica de Sintonia dos ganhos

Os métodos de ajuste dos ganhos para que o controlador responda da forma desejada são chamados de sintonia dos ganhos. Os ganhos são K_c , t_i e t_d . Existem vários métodos para realizar a sintonia desejada (BRITO, 2014). Neste trabalho, como o comportamento do sistema em estudo é desconhecido, optou-se por utilizar o método heurístico de Ziegler e Nichols (1942), que consiste em encontrar o limite de estabilidade da planta em malha fechada com o controle proporcional.

O primeiro passo, em malha fechada, foi aumentar o ganho proporcional gradativamente até se obter uma reposta oscilatória com amplitude constante. Neste ponto determinou-se o ganho último (K_u) e o período de oscilação (P_u). O ganho último (K_u) é este ganho do controlador P que gerou uma resposta oscilatória na variável controlado no limite de estabilidade, com um período (P_u). Se o ganho de controlador for maior que (K_u), então o sistema será instável (TEIXEIRA, 2010).

No segundo passo, com o valores de K_u e P_u , que representam a dinâmica do processo, obteve-se a sintonia do controlador PID. Os parâmetros são calculados de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 – Sintonia segundo Ziegler e Nichols (1942).

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$	-	-
PI	$0.45 K_u$	$P_u/1.2$	-
PID	$0.6 K_u$	$P_u/2$	$P_u/8$

Fonte: Teixeira (2010, p. 48)

4.4.4 Critério de desempenho

Neste trabalho foi realizado a comparação entre os controladores P, PI e PID. A partir de critérios de desempenho foi definido qual melhor estratégia a ser adotada para o controle do levitador pneumático. Segundo Ogata (2011) os sistemas de controle são projetados para

realizar tarefas específicas e os requisitos impostos aos sistemas geralmente são explicitados como especificações de desempenho, como máximo sobressinal e tempo de acomodação na resposta à entrada em degrau.

Para o sistema proposto no trabalho, o máximo sobressinal será o critério de desempenho avaliado. O máximo sobressinal, M_p , é o valor máximo de pico da curva de reposta, medido a partir da unidade. Se o valor final da resposta em regime permanente diferir da unidade, então é comum utilizar porcentagem máxima de sobressinal, definida por: (OGATA, 2011).

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (9)$$

Onde $c(t_p)$ é a resposta do sistema, a variável de processo, e o $c(\infty)$ é o valor de referência, o *setpoint*.

Também foram escolhidos os critérios da integral do erro que, segundo Mulholland (2016) é o índice mais utilizado para avaliação de desempenho de controlador. Os critérios utilizados foram:

- Integral do valor absoluto do erro (IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (10)$$

- Integral do valor absoluto do erro multiplicado pelo tempo (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (11)$$

- Integral do erro quadrático (ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (12)$$

4.4.5 Compartilhamento de dados na nuvem

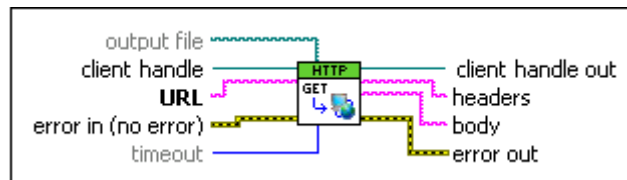
Usando os recursos do ambiente LabVIEW, foi possível coletar os sinais e armazená-los para processamento posterior. Também pode-se aplicar uma das plataformas IoT e protocolos de comunicação de dados mais populares (KALOVREKTIS, 2020). Neste trabalho, foi

proposto uma comunicação com a plataforma *ThingSpeak*, que permite criar canais para o monitoramento dos dados da bancada na nuvem.

Inicialmente, para se utilizar o *ThingSpeak* é necessário realizar um cadastro no site da plataforma. Após o cadastro, o usuário já pode utilizar o sistema gratuitamente. Ainda dentro do site, na aba *settings*, cria-se um canal para o recebimento dos dados, a qual é atribuído um endereço URL para o compartilhamento dos dados na nuvem.

Com o bloco GET.vi (figura 32) os dados processados no LabVIEW são enviados para o ThingSpeak utilizando o URL gerado no site da plataforma.

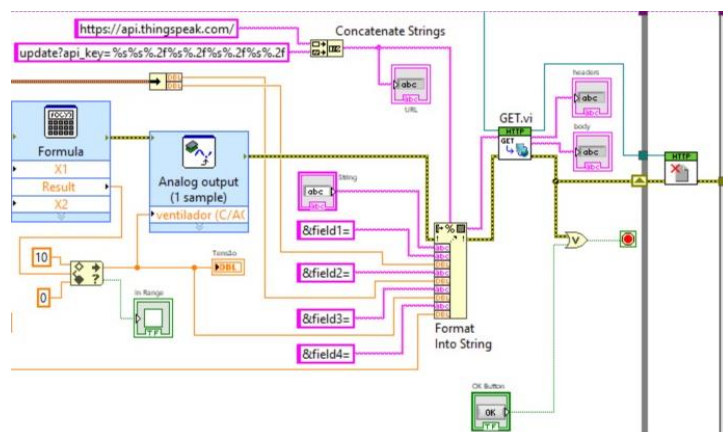
Figura 32 – Bloco GET.vi



Fonte: Próprio Autor (2022)

Nesse bloco cada variável monitorada é atribuída a um campo dentro do canal criado e os dados em cada campo podem ser acessados e monitorados em forma de gráficos ao longo do tempo no site da plataforma, o envio de dados para a nuvem ocorre a cada 15 segundos. A figura 33 exibe o envio de dados do LabVIEW para o *ThingSpeak*.

Figura 33 – Envio de dados para o *ThingSpeak*.



Fonte: Próprio Autor (2022)

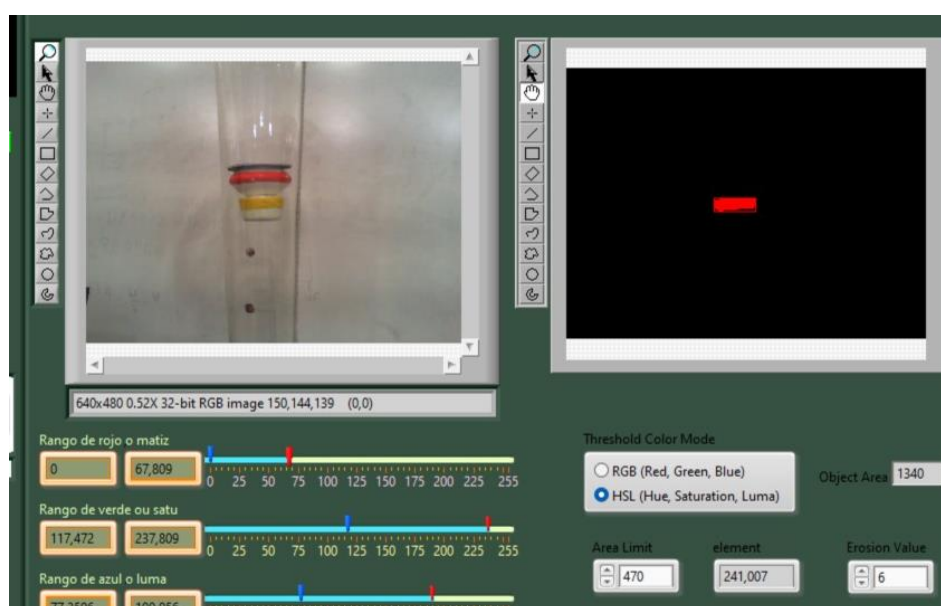
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção são apresentados os resultados do processamento digital de imagens e das sintonias para os três controladores proporcional (P), proporcional-integrativo (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID), bem como os resultados comparativos dos desempenhos dos métodos e elege-se a melhor estratégia para o controle de altura do sistema utilizando os dados obtidos pelo processamento digital de imagens. Por fim, apresentam-se os resultados do armazenamento dos dados na nuvem, por meio de gráficos elaborados na plataforma *ThingSpeak* para visualização em tempo real de forma remota.

5.1 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

A figura 34 mostra a interface desenvolvida no *software* LabVIEW[®] exibindo o display de visualização das imagens, ou seja, um vídeo, em tempo real. A câmera foi posicionada a uma distância que conseguisse encaixar a base e o topo do levitador pneumático na imagem. É possível notar os centros de massa sendo extraídos, no quadro “Centroíde”. Utilizando o dado do centro de massa na coordenada y e a equação (7), obteve-se a altura do objeto a cada instante.

Figura 34 – Resultado do processamento de imagem no LabVIEW[®]



Fonte: Próprio Autor (2022)

Abaixo do display é o local onde o usuário deve informar os valores do limiares de

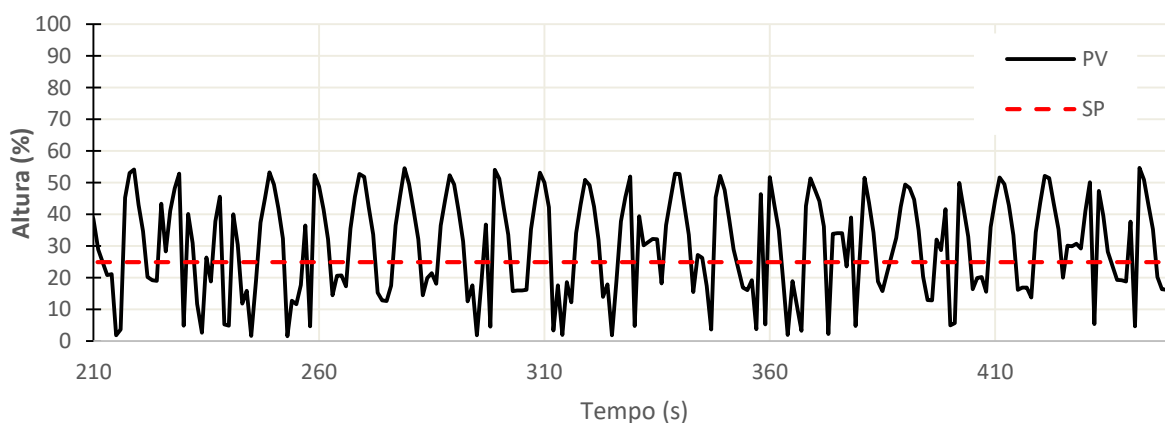
acordo com a cor que deseja identificar. Essa é uma etapa que toma muito tempo durante a execução. Manualmente o usuário deve selecionar os valores movimentando os *slicers*, até que encontre os valores certos dos limites, outro problema está relacionado à iluminação do ambiente, a incidência de luz no objeto afeta no tom das cores, o que dificulta a determinação dos limites certos para a etapa de segmentação, reflexos e sombras também foram dificuldades durante essa etapa.

O display a direita exibe a imagem segmentada de acordo com a cor de escolha, com a imagem segmentada é possível extrair informações da região de interesse com facilidade, com o objetivo de encontrar a altura do objeto na vertical, então extraiu-se o centro de massa, que pode ser visto no quadro “element”, com a informação do centro de massa e equação (7) calcula-se a altura do objeto.

5.2 SINTONIA E AJUSTE FINO DOS CONTROLADORES P, PI E PID

De acordo com o procedimento descrito na seção 4.4.2, primeiramente deve-se obter os parâmetros que representam a dinâmica do processo. A figura 35 mostra a resposta oscilatória (limite de estabilidade) da variável de saída.

Figura 35 – Resposta oscilatória da variável de saída.



Fonte: Próprio Autor (2022)

O valor de K_u encontrado para gerar a oscilação sustentada na saída de controle foi de 0,0075. Devido aos distúrbios inerentes ao sistema, não foi possível obter um período bem definido, por tanto, optou-se por usar uma média para determinar o período crítico, o P_u obtido foi de 10 segundos.

Com os dados de K_u e P_u calcularam-se os valores de k_p , T_i e T_d de acordo com a tabela 2 para os controladores P, PI e PID, que podem ser observados na tabela 3.

Tabela 3 – Ganhos dos controladores P, PI, PID pelo método de Ziegler - Nichols

Controlador	K_c	T_i	T_d
P	0,0035	-	-
PI	0,003375	8,33	-
PID	0,0045	5	1,25

Fonte: Próprio Autor (2022)

A sintonia pelo método heurístico de Ziegler – Nichols geralmente produz uma sintonia agressiva, por conta disso, sugere-se realizar um ajuste fino nos parâmetros fazendo observações no comportamento do processo.

O ganho $K_c = 0,0035$ apresentou grandes oscilações com sobressinal máximo de 59% para baixos *sepoints* de altura (abaixo dos 50%), ponto de operação onde necessita-se um controle mais sensível, esse comportamento indica uma resposta agressiva, justificando a realização de um ajuste fino após a sintonia. Um $K_c = 0,002$ foi determinado reduzindo o sobressinal para 12%. Para os controladores PI e PID, também foi realizado um ajuste fino. Os resultados podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4 – Ganhos dos controladores P, PI, PID com ajuste fino

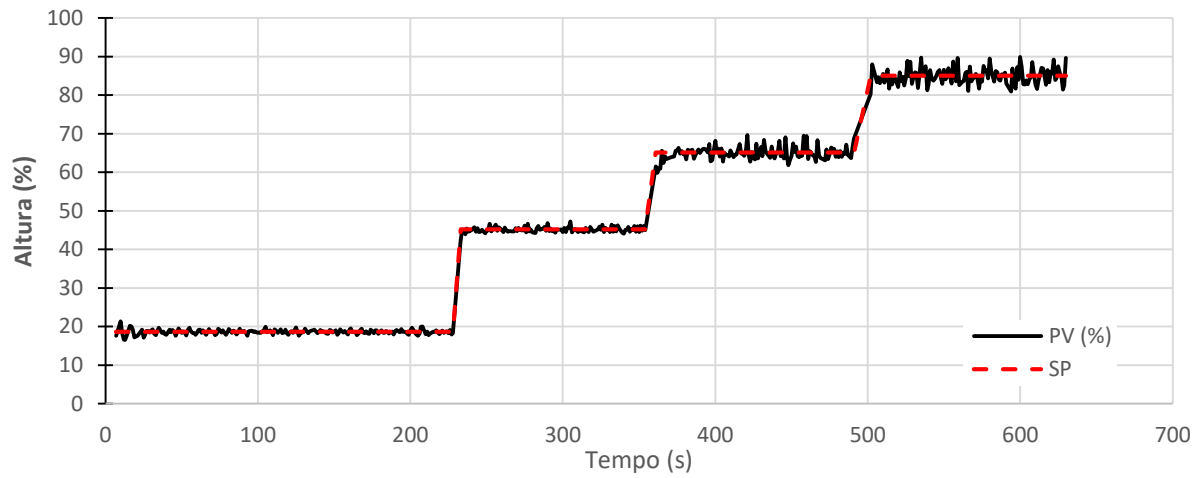
Controlador	K_c	T_i	T_d
P	0,002	-	-
PI	0,002	20	-
PID	0,002	20	1,5

Fonte: Próprio Autor (2022)

5.3 DESEMPENHO DOS CONTROLADORES P, PI E PID

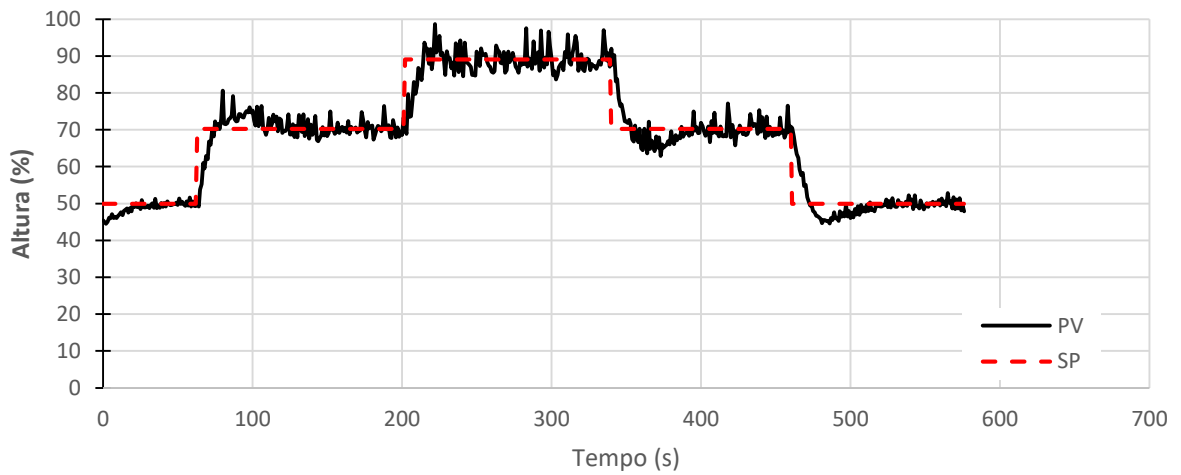
Após realizada a sintonia e ajuste fino dos parâmetros dos controladores, foi realizado uma comparação para determinar qual melhor estratégia de controle a ser utilizado na planta de levitação pneumática. Com o objetivo de comparar e quantificar os desempenhos, foram realizados testes com estímulo de degrau no *setpoint* e os índices descritos na seção 4.4.5 foram utilizados para avaliar o desempenho dos controladores frente às variações do sinal de referência. Os comportamentos para os controladores P, PI e PID são apresentados na figura 36, figura 37 e figura 38, respectivamente.

Figura 36 – Comportamento controle P.



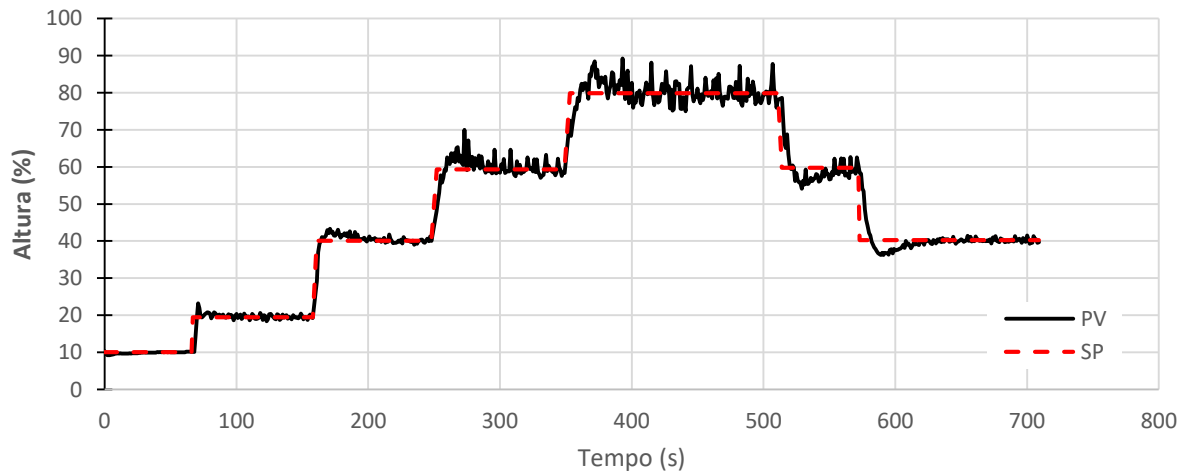
Fonte: Próprio Autor (2022)

Figura 37 – Comportamento controlador PI.



Fonte: Próprio Autor (2022)

Figura 38 – Comportamento controlador PID.



Fonte: Próprio Autor (2022)

Em uma análise gráfica percebe-se que todos os controladores se comportam bem a mudanças de *setpoints*. Cada malha seguiu sua respectiva referência, com rápido tempo de subida, rápida tempo de acomodação e baixo sobressinal. Percebe-se também pequenas oscilações presentes na variável de controle em regime permanente, tal oscilação é influenciada pela instabilidade física da bancada e pela aerodinâmica do corpo sendo levitado pela corrente de ar, oscilações que influenciam na medição da variável de processo.

Em uma análise quantitativa por meio dos índices de desempenho a partir da resposta ao degrau do sistema, que podem ser vistos na tabela 5, o controle P apresenta melhor desempenho. Dentre os três controladores, o proporcional apresenta os menores valores médios para os quatro índices de desempenho.

Tabela 5 – Comparação de desempenho dos controladores

Controlador	Sobressinal Médio	IAE Médio	ITAE Médio	ISE Médio
P	8%	129	11016	257
PI	13%	399	55286	2711
PID	15%	188	24251	772

Fonte: Próprio Autor (2022)

Especificamente para essa aplicação avaliar o sobressinal é muito importante, pois variações muito bruscas na variável de processo podem causar o arrasto do objeto para fora do sistema. Os três controladores apresentam sobressinal relativamente baixos, que não comprometem o funcionamento do sistema, no entanto, o controle proporcional apresentou melhor desempenho em relação a esse parâmetro, seguido do controle proporcional-integrativo (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID).

Analisando os índices IAE, ITAE e ISE, novamente o controle proporcional apresentou melhores resultados, o que significa que o controlador se comporta melhor diante às mudanças de *setpoint*, seguido do controlador PID e PI, respectivamente. É importante entender o motivo que levou o controle proporcional a apresentar o melhor desempenho em relação aos outros.

Quando se combina o controle integrativo ao proporcional, PI, segundo Ogata (1997) a ação integral elimina o erro em regime permanente, porém o tempo de acomodação e sobressinal são afetados, diminuindo a estabilidade relativa do sistema. Isso explica o porquê do controlador proporcional-integrativo apresentar um sobressinal maior que o controlador proporcional, esse fato pode ser somado a um possível erro do ajuste fino e as variações inerentes à bancada experimental.

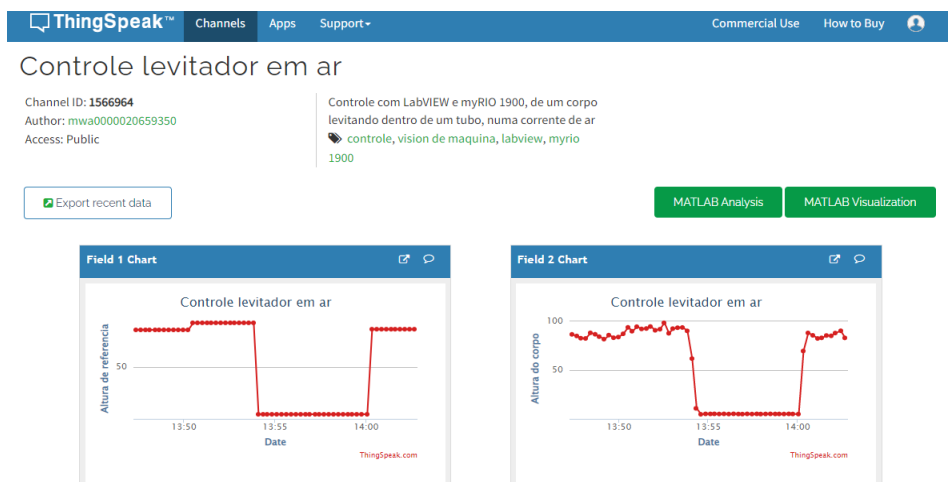
Em relação ao controlador proporcional-integral-derivativo (PID), esperava-se que obtivesse o melhor desempenho, no entanto, para tal aplicação demonstrou não ser tão eficaz em comparação ao controle proporcional, apesar de ter apresentado bons resultados. O fato da bancada experimental apresentar muitas oscilações que impactam na medição da variável de processo, tem um peso maior sobre o controlador PID, pois, segundo Boeira (2016) a parcela derivativa do sinal de controle tende a amplificar o ruído de medição contido no processo, o que acaba acarretando em oscilações indesejadas e desgaste nos atuadores, isso explica o porquê do controlador ter apresentado o maior sobressinal dentre os três. Além disso, a ação derivativa é recomendada para processos com dinâmica lenta, que não é o caso da planta de levitação pneumática.

Dessa forma, o controlador proporcional, que apresentou as melhores notas para os índices de desempenho, foi eleito a melhor estratégia para o controle de altura do sistema de levitação pneumática, sendo suficiente para rastrear o *setpoint* e rejeitar as perturbações, porém bastante oscilante devido a aerodinâmica do objeto flutuando e a estrutura física da bancada.

5.4 COMPARTILHAMENDO DE DADOS NA NUVEM

A figura 39 exibe a tela de acesso ao *dashboard* criado no site da plataforma do *ThingSpeak*. No canal criando é possível observar gráficos temporais do *setpoint* e da *PV* da altura do corpo levitante em um horizonte de tempo em minutos. A plataforma também permite exportar os dados para um arquivo CSV, utilizando o botão “*Export recent data*”. O canal pode ser acessado utilizando o seguinte URL(<https://thingspeak.com/channels/1566964>).

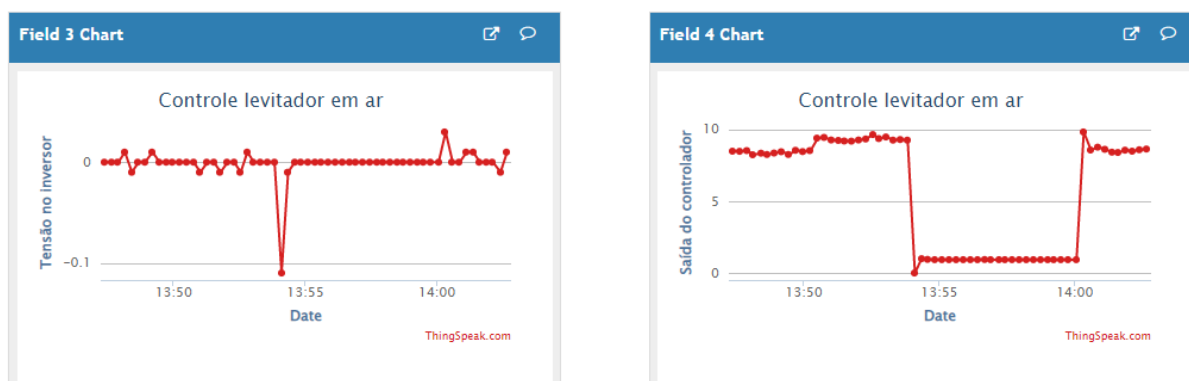
Figura 39 – Gráficos do *setpoint* e da *PV* da altura do corpo levitante no site do *ThingSpeak*.



Fonte: Próprio Autor (2022)

A figura 40 mostra os gráficos de tensão no inversor de frequência e da saída de controle calculado pelo controlador proporcional.

Figura 40 – Gráficos do tensão no inversor de frequência e do saída de controle no site do *ThingSpeak*.



Fonte: Próprio Autor (2022)

A plataforma também permite exibir a geolocalização do sistema de coleta de dados. Como pode ser visto, a utilização da aplicação de *IoT* com a plataforma *ThingSpeak* para o envio de dados foi obtida com sucesso. No entanto, é válido ressaltar que, a plataforma foi utilizada de forma totalmente gratuita, dessa forma a aplicação possuiu algumas limitações, o acesso gratuito limita o intervalo de envio de dados para a cada 15 segundos e tem restrição de 3 milhões de envios por ano. Em vista disso, realizar o monitoramento do sistema em tempo real de forma remota não se demonstra eficiente utilizando a versão gratuita da plataforma, já que a amostragem dos dados da bancada são a cada 1 segundo. Logo, essa limitação prejudica a aplicação dessa plataforma para análise em tempo real, necessitando da busca de outras ferramentas ou optar pela versão paga.

6 CONCLUSÃO

A principal contribuição desse trabalho foi a utilização da visão computacional para o controle de processos, somado a uma aplicação de IoT que, permitiu o envio dos dados de processo para nuvem, possibilitando a visualização e análise dos dados de forma remota.

A utilização da visão computacional como sensor de posição que retroalimenta o sinal de processo no controlador foi alcançando com êxito. O processamento de imagem digital desenvolvido no software LabVIEW® foi capaz de extrair informações das imagens, como a altura do objeto levitante no levitador pneumático. No entanto, algumas condições como a iluminação do ambiente dificultaram a aplicação, definir os limiares certos para etapa de segmentação demandou uma grande quantidade de tempo.

Com base nos índices de desempenho, utilizados como critérios, conclui-se que o controle Proporcional apresentou os melhores resultados para o controle de altura do sistema de levitação pneumática. Com este controlador, o sistema foi capaz de seguir os valores de referência apresentando as menores variações possíveis. Além disso, o método de Ziegler-Nichols foi uma ótima estimativa inicial para a sintonia dos controladores, já que foi necessário um ajuste fino dos parâmetros para que o sistema pudesse proporcionar uma melhor resposta, sendo um processo iterativo e manual, há a possibilidade do ajuste não ter sido o melhor para que pudesse apresentar resultados mais favoráveis.

Por fim, o compartilhamento dos dados na nuvem foi possível. O *ThingSpeak* mostrou-se confiável no envio dos resultados online durante a execução dos experimentos. Porém, a limitação da versão gratuita da ferramenta, inviabiliza a análise dos dados em tempo real, pois os dados são enviados a cada 15 segundos, gerando um atraso na visualização dos dados no site da plataforma.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, ADRIANNE PAULA VIEIRA et al. Adoção de sistemas de armazenamento de dados na nuvem: um estudo com usuários finais. **RAI Revista de Administração e Inovação**, v. 12, n. 4, p. 4-25, 2015.

BALAN, Willians Cerozzi; INSTRUCIONAL, Apostila. A Imagem Digital. **Apostila, UNESP, São Paulo, SP, Brasil, 14p**, 2009.

BARBOSA, P. **UPBox: Armazenamento na Nuvem para Dados de Investigação da U. Porto**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Informática e Computação) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

BARCELOS, Matheus de Oliveira et al. **Protótipo de Sistema de Visão Computacional para captura, análise e Transmissão de Imagens aquáticas**. 2021. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Computação) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Araranguá, 2021.

BIGHETI, J. A.; CALDIERI, M. R.; GODOY, E. P. Automação e controle de processos na nuvem: proposta e estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 21, 2018. Vitória. **Resumo de trabalho**. Vitória: CBA, 2016.

BOEIRA, Emerson Christ. **Projeto de controladores descentralizados em um processo de nível multivariável através do método do ponto crítico**. 2016.

BOMFIM, MARCELO HENRIQUE SOUZA et al. A novel hybrid (PID+ MRAC) adaptive controller for an air levitation system. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 8, p. 1400-1409, 2021.

BRITO, Robison C.; MADALOSSO, Emanoeli; GUIBES, Geovane AO. **Seguidor de linha para LEGO® Mindstorms utilizando controle PID**. Anais do Computer on the Beach, p. 310-319, 2014.

CASTILLO-G J, PINTADO-G M, CARPIO-A M, SALTARÉN R, RODRÍGUEZ A. Linearization and control of a system of pneumatic suspension of a sphere. In: CHACON, JESUS et al. Design of a low-cost air levitation system for teaching control engineering. **Sensors**, v. 17, n. 10, p. 2321, 2017.

CHITODE, J. S..**Numerical Techniques**. Pune, India: Technical Publications Pune. 2008.

DA FONSECA NETO, JOÃO VIANA; SOUSA, MONIK SILVA; ARAUJO FILHO, EVANDRO MARTINS. Controle de posição de um sistema de levitação pneumática. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 40063-40076, 2020.

DE ALMEIDA, Carlos Diego F. et al. Arquitetura de sistema em nuvem para apoio à implantação de visão computacional em linhas de produção na Indústria 4.0. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 15, 2021, Rio Grande (Online). **Anais eletrônicos**. Rio Grande (Online): SBAI, 2021.

DE LIMA LEMOS, RAFAEL et al. **Simulação de escoamento com efeito coanda sobre perfis hidrodinâmicos**. *Exatas & Engenharias*, v. 8, n. 20, 2018.

DE LIMA OLIVEIRA, Cleber; DE SOUZA, Antônio Henrique GOMES; LIMA, Marcos Antonio Dias. **CAPTAÇÃO DA PULSAÇÃO E ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA FREQUÊNCIA CARDÍACA COM FPGA**. *Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula*, v. 4, n. 2, p. 97-107, 2021.

DE MILANO, Danilo; HONORATO, Luciano Barrozo. **Visão computacional**. 2014. Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2014.

DE OLIVEIRA SOUZA, Marcelo et al. ANÁLISES DAS CORRENTES DE PARTIDA DE UM MOTOR TRIFÁSICO ACIONADO POR CHAVE CONVENCIONAL E POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, v. 4, n. 1, p. 51-51, 2017.

DE OLIVEIRA, Sérgio. **Internet das coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry PI**. Novatec Editora, 2017.

DE SOUZA, Henrique Freitas Alabi; RONCHI, Leonardo Farias; RIBEIRO, Rosa Maria. **CONTROLE PID DE NÍVEL VIA DEVICENET**.2013

DE SOUZA, RAFAEL PISSINATI et al. **Fabricação e controle de um levitador pneumático duplo reverso acoplado**. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI. 2021

DELETTRE A, LAURENT GJ, HADDAB Y, LE FORT-PIAT N. **Robust control of a planar manipulator for flexible and contactless handling**. Mechatron. 22(6):852–61; 2012.

DELETTRE, ANNE; LAURENT, GUILLAUME J.; LE FORT-PIAT, NADINE. A new contactless conveyor system for handling clean and delicate products using induced air flows. In: **2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. IEEE, p. 2351-2356, 2010.

FABRE, Diego Tiburcio. **Desenvolvimento de um sistema de visão para inspeção automatizada de peças da indústria cerâmica**. 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecatrônica) – Faculdade de Engenharia Mecatrônica, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, IFSC, Florianópolis, 2019.

FIDELIS, Ricardo Tirone et al. **Modelagem matemática e sistema embarcado em DSP/FPGA para acionamento e controle de um GRV 8/6 com estimativa em tempo real das curvas de indutância e conjugado**. 2018.

FONSECA, Patrick Suarez. **Gásnamedida: plataforma de controle de concentração de gás**. 2018. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Internet das Coisas) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UFTPR, Curitiba, 2018.

FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T. **Introdução À Mecânica Dos Fluidos**. Grupo Gen-LTC, 2000.

FREEDMAN, Roger A.; YOUNG, Hugh D. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. 2008.

FREITAS, Rodrigo Fernandes et al. **Algoritmos para segmentação da pele utilizando modelos de cores rgb em ambiente matlab/simulink**. *Conexões-Ciência e Tecnologia*, v. 1, n. 1, p. 65-71, 2007.

FRICK, Marcio André Dell'aglio et al. **Caracterização de ferro por visão computacional**. 2008. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, 2008.

GALLON, Lucas. **Sistema de visão computacional para classificação de pedras naturais através de vídeo em tempo real**. 2013.72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Sistemas da Informação) – Faculdade de Sistemas da Informação, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2013.

GOBBI, M., DIAS, N. L., MACARENHAS, F., & VALENTINE, E. **Introdução à Mecânica dos Fluidos e aos Fenômenos de Transporte**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Paraná. 2006.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Editora Blucher, 2000.

GUEDES, Felipe Souza. **Internet das coisas (IoT–Internet of Things)- Implementação de um medidor de energia elétrica com conexão a Internet**. 2018.

IEEE XXIV international conference on electronics, electrical engineering and computing (INTERCON). p. 1–4, 2017.

KALOVREKTIS, Konstantinos et al. 802.15. **4-based Efficient Wireless Sensor System Design for Monitoring Blood Oxygen and Heart Rate in IoT Medical Applications**. In: 2020 11th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA. IEEE, p. 1-7, 2020.

MARQUES, Daniel C. et al. **Um sistema de medição de volume por visão computacional**. Technical report, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Industrial- FEI, 1999.

MULHOLLAND, Michael. Applied process control. Editora: Wiley – VCH, International Edition, 1ª Edição, 2016.

NETO, Anis Assad et al. A busca de uma identidade para a indústria 4.0. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 4, p. 1379-1395, 2018.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Prentice Hall, 1997.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5º ed. Editora Pearson. 2011.

OLIVEIRA, Laira Stephanie Batista de. **Sistema de inspeção de corrosão superficial de peças de aço por visão computacional**. 2017. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense- UFF, Niterói, 2017.

OMAR, MUHAMAD HAZIQ. **Air Levitation level control**. Tese de Doutorado. Murdoch University. 2018.

PACCHINI, Athos Paulo Tadeu et al. Indústria 4.0: barreiras para implantação na indústria brasileira. **Exacta**, v. 18, n. 2, p. 278-292, 2020.

PACHECO, Luis Alberto Belem. **Arquitetura para privacidade na integração de internet das coisas e computação em nuvem**. 2018. 92 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Faculdade de Ciência da Computação, Universidade de Brasília - UnB, Brasília, 2018.

PARENTE, Andréa P. et al. Automação de Processos Industriais: do Pneumático à Indústria 4.0. **Revista Processos Químicos**, v. 12, n. 24, p. 101-108, 2018.

PAVANI FILHO, Aristides et al. Sistemas de monitoramento baseados em tecnologia de internet das coisas para monitoramento ambiental de ambientes impactados por petróleo: uma revisão In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 4, 2021, Online. **Anais eletrônicos**. Online: CONEPRETO, 2021. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/edicao/detalhes/anais-do-iv-conepetro-e-vi-wepetro>.

Acesso em: 25 março 2022.

PEREIRA, RENZO CALDELLAS. **Ensaio de desempenho de ventiladores em uma bancada didática**. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Mecânica. Vitória, 2014.

PERSECHINO, André; DE ALBUQUERQUE, Márcio Portes. **Processamento digital de imagens: conceitos fundamentais digital image processing: fundamental concepts**. MONOGRAFIAS-CBPF, v. 1, n. 4, 2015.

QUINTA, Lia Nara Balta. **Desenvolvimento de um sistema de visão computacional para o controle microbiano em processos de produção de etanol**. 2009. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia da Computação) – Faculdade de Engenharia da Computação, Universidade Católica Dom Bosco - UCDB, Campo Grande, 2009.

REED, J. N.; MILES, S. J. High-speed conveyor junction based on an air-jet floatation technique. **Mechatronics**, v. 14, n. 6, p. 685-699, 2004.

RIBEIRO, Alyson Bezerra Nogueira; REBOUÇAS FILHO, Pedro Pedrosa; CAVALCANTE, Tarique da Silveira. **Desenvolvimento de um software para determinação da densidade de nódulos de grafita em ferro fundido nodular utilizando visão computacional** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6, 2010, Campina Grande. **Resumo dos trabalhos**. Campina Grande: CONEM, 2010.

RODRÍGUEZ-ZALAPA, OMAR; HERNÁNDEZ-ZAVALA, ANTONIO; HUERTA-RUELAS, JORGE ADALBERTO. **Fuzzy controller for a pneumatic positioning**

nonlinear system. In: Mexican International Conference on Artificial Intelligence. Springer, Cham. p. 370-381, 2014.

SANTOS, Beatrice Paiva et al. **Indústria 4.0: desafios e oportunidades.** Revista Produção e Desenvolvimento, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.

SANTOS, Bruno P. et al. Internet das coisas: da teoria à prática In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 34, 2016. Salvador. **Anais eletrônicos.** Salvador: SBRC, 2016. Disponível em: <http://www.sbrc2016.ufba.br/anais-slides/trilha-principal/>. Acesso em: 25 março 2022.

SILVA, Carolina Cavalcanti Pedrosa et al. **Método não-invasivo utilizando a frequência de micro-ondas para verificação da concentração de etanol em gasolina.** 2019.

SILVA, Danilo Goulart da. **Indústria 4.0: conceito, tendências e desafios.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2017.

SILVA, Guilherme Damasceno. **Desenvolvimento de um sistema de visão computacional para o estudo do comportamento de animais experimentais.** 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Elétrica, Universidade Estadual de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SIQUEIRA, Dalila Vaine et al. **Sistema de monitoramento empregando automação e internet das coisas para o tratamento biológico de efluente têxtil.** Prêmio Mercosul de Ciência e Tecnologia, MCTI, p. 39-59, 2018.

SOUSA, Flávio RC; MOREIRA, Leonardo O.; MACHADO, Javam C. **Computação em nuvem: Conceitos, tecnologias, aplicações e desafios.** II Escola Regional de Computação Ceará, Maranhão e Piauí (ERCEMAPI), p. 150-175, 2009.

SOUZA, R.P.D., LUNA, J.D.F.D.O., AND HELENA, F.G. **Modelagem e controle de um levitador pneumático reverso.** In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE RONDÔNIA, 2, 2020, Rondônia: SETER, 2020.

STIVANELLO, Maurício Edgar. **Inspeção industrial através de visão computacional**. 2004. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências da Computação) – Faculdade de Ciência da Computação, Universidade Regional de Blumenau - FURB, Blumenau, 2004.

SZULHA, Lucas Rafael; SZULHA, Murilo Rafael. **Desenvolvimento de uma arquitetura IoT para controle de vazamentos em tubulações de água**. 2018. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) -Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Ponta Grossa, 2018.

TAKÁCS, GERGELY et al. FloatShield: An open source air levitation device for control engineering education. **IFAC-PapersOnLine**, v. 53, n. 2, p. 17288-17295, 2020.

TEIXEIRA, Eng Herbert Campos Gonçalves et al. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. Editora Blucher, 2010.

TRANCOSSI, Michele. **An overview of scientific and technical literature on Coanda effect applied to nozzles**. 2011.